

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Petar Filipović

Zagreb, 2017

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Damir Dović, dipl. ing.

Student:

Petar Filipović

Zagreb, 2017.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svom mentoru, prof. dr. sc. Damir Dović, dipl. ing. na pomoći i savjetima tijekom izrade diplomskog rada. Također, htio bih se zahvaliti i prof. dr. sc. Željku Tukoviću, dipl. ing. na pomoći i savjetima tijekom studiranja.

Zahvaljujem se svojoj djevojci Corrini Rus kao i obitelji na podršci i strpljenju tijekom studiranja.

Petar Filipović



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje
Datum: 29. 11. 2017. Prilog
Klasa: 602-04/17-6/4
Ur. broj: 15-103-17-381

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: Petar Filipović

Mat. br.: 0035188405

Naslov rada na hrvatskom jeziku: Analiza toplinskih karakteristika polimernog solarnog toplovodnog kolektora

Naslov rada na engleskom jeziku: Analysis of thermal performances of polymer solar hot water collector

Opis zadatka:

Klasični solarni kolektori za zagrijavanje vode koji se danas komercijalno koriste već su dosegli visoke vrijednosti toplinske učinkovitosti. Značajnije poboljšanje toplinskih karakteristika moguće je postići tek većim izmjenama konstrukcije. Također, prepreka širem korištenju je i relativno visoka cijena. Iz tog razloga se razvoj solarne tehnologije sve više usmjerava na polimerne kolektore koje je moguće proizvesti po znatno nižoj cijeni uz jednostavniju primjenu konstrukcijskih izmjena. Pri tome je izazov kako riješiti problem deformacije/propadanja materijala pri povišenim temperaturama.

U ovom radu je potrebno razviti model za određivanje toplinskih karakteristika novog tipa solarnog toplovodnog kolektora izrađenog od polimera, kao dijela postupka optimizacije i izrade prototipa.

U prvom dijelu rada potrebno je:

- razviti analitički model za proračun učinkovitosti klasičnog pločastog solarnog kolektora pri proizvoljnim radnim parametrima
- rezultate modela usporediti s ispitivanjima u Laboratoriju za toplinu i toplinske uređaje
- nakon toga, potrebno je izraditi model istog kolektora u odabranom računalnom programu za numeričke simulacije i validirati ga koristeći analitički model i rezultate ispitivanja

U drugom dijelu rada potrebno je:

- koristeći iskustva iz prvog modela, razviti model za određivanje novog tipa polimernog solarnog kolektora
- rezultate usporediti s onima drugih proizvođača polimernih i klasičnih solarnih toplovodnih kolektora
- dati smjernice za izmjene konstrukcije i optičkih svojstava apsorbera i pokrova radi postizanja čim veće toplinske učinkovitosti te snižavanja temperature toplinski najviše opterećenih dijelova kolektora kako ne bi došlo do njihove deformacije/propadanja

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

Datum predaje rada:

Predviđeni datum obrane:

28. rujna 2017.

30. studenog 2017.

6., 7. i 8. prosinca 2017.

Zadatak zadao:

Predsjednica Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Damir Dović

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK.....	IX
SUMMARY	X
1. UVOD.....	1
2. POLIMERNI SOLARNI KOLEKTOR.....	2
3. PLOČASTI SOLARNI KOLEKTOR	7
3.1. OSNOVNI MEHANIZMI IZMJENE TOPLINE	9
3.2. PRORAČUN TOPLINSKIH GUBITAKA	10
3.2.1. Izmjena topline slobodnom konvekcijom u prostoru između apsorbera i stakla	10
3.2.2. Izmjena topline zračenjem apsorbera prema staklu	11
3.2.3. Izmjena topline slobodnom ili prisilnom konvekcijom u prostoru iznad pokrovnog stakla	11
3.2.4. Izmjena topline zračenjem stakla prema nebu	12
3.3. ODREĐIVANJE TEMPERATURE STAKLA	12
3.4. POSTUPAK ODREĐIVANJA SREDNJE TEMPERATURE VODE I APSORBERA	12
3.4.1. Faktor učinkovitosti rebra	13
3.4.2. Faktor efikasnosti kolektora i faktor odvođenja topline	14
3.4.3. Određivanje srednjih temperatura	15
3.5. UČINKOVITOST KOLEKTORA	16
4. REZULTATI ANALITIČKOG PRORAČUNA SOLARNOG KOLEKTORA.....	18
4.1. UČINKOVITOST KOLEKTORA U LJETNOM I ZIMSKOM REŽIMU RADA ..	18
4.2. PARAMETARSKA ANALIZA KOLEKTORA.....	22
5. NUMERIČKI MODEL SOLARNOG KOLEKTORA	26
5.1. IZMJENA TOPLINE SLOBODNOM KONVEKCIJOM.....	26
5.2. IZMJENA TOPLINE ZRAČENJEM	28
5.3. DISKRETIZACIJA PODRUČJA PRORAČUNA I RUBNI UVJETI	31
5.3.1. Pločasti solarni kolektor.....	31
5.3.2. Polimerni solarni kolektor.....	32
5.3.3. Rubni uvjeti.....	35
6. REZULTATI NUMERIČKIH SIMULACIJA	37
6.1. PLOČASTI SOLARNI KOLEKTOR.....	37
6.2. POLIMERNI SOLARNI KOLEKTOR	39
6.2.1. Učinkovitost polimernog solarnog kolektora.....	41
ZAKLJUČAK	43
LITERATURA.....	45

PRILOZI.....	46
--------------	----

POPIS SLIKA

Slika 1 Neostakljeni polimerni solarni kolektor [1]	2
Slika 2 Rezultati ispitivanja polimernog solarnog kolektora [3].....	3
Slika 3 Kolektor difuznog zračenja [4]	4
Slika 4 Kolektor s prizmatičnom strukturom [7]	5
Slika 5 Toplovodni solarni sustav [8]	7
Slika 6 Razne konstrukcijske izvedbe pločastih kolektora [8].....	8
Slika 7 Pločasti solarni kolektor s osnovnim dijelovima [8].....	8
Slika 8 Shematski prikaz izmjene topline u kolektoru [9]	9
Slika 9 Prikaz toplinskih otpora u analogiji s električnim krugovima	10
Slika 10 Prikaz cijevi i rebra [9].....	13
Slika 11 Blok dijagram rješavanja matematičkog modela solarnog kolektora	17
Slika 12 Krivulje učinkovitosti kolektora za ljetni režim rada.....	19
Slika 13 Krivulje učinkovitosti kolektora za zimski režim rada	21
Slika 14 Utjecaj koeficijenta prijelaza topline s cijevi na vodu	22
Slika 15 Utjecaj vodljivosti spoja na učinkovitost kolektora	23
Slika 16 Utjecaj udaljenosti stakla i ploče apsorbera na učinkovitost kolektora	23
Slika 17 Utjecaj koeficijenta prijelaza topline sa stakla na okolišni zrak na učinkovitost kolektora	24
Slika 18 Utjecaj optičkih svojstava na učinkovitost kolektora	25
Slika 19 Profil brzine i temperature u laminarnom strujanju uz stjenku [9]	27
Slika 20 Prikaz prostorne točke c_0 [9]	29
Slika 21 Položaj kontrolnih kutova - strukturirana mreža [13].....	30
Slika 22 Položaj kontrolnih kutova - nestrukturirana mreža [13]	30
Slika 23 Geometrija pločastog kolektora	31
Slika 24 Geometrijska mreža apsorbera i graničnog sloja iznad apsorbera	31
Slika 25 Geometrijska mreža stakla i graničnog sloja uz staklo	32
Slika 26 Geometrijska mreža pokrova i graničnog sloja (prvi model)	33
Slika 27 Geometrijska mreža jednog kanala i graničnog sloja iznad (prvi model).....	33
Slika 28 Geometrijska mreža pokrova i graničnog sloja (drugi model)	34
Slika 29 Geometrijska mreža jednog kanala i graničnog sloja iznad (drugi model).....	34
Slika 30 Postavljanje rubnih uvjeta za pločasti kolektor.....	35
Slika 31 Postavljanje rubnih uvjeta za polimerni kolektor	36
Slika 32 Temperaturno polje klasičnog solarnog kolektora kod modela s grijačem za RT1 (slika lijevo) i RT4 (slika desno)	38
Slika 33 Polje brzine klasičnog solarnog kolektora kod modela s grijačem za RT1 (slika lijevo) i RT4 (slika desno)	38
Slika 34 Temperaturno polje klasičnog solarnog kolektora kod semi transparent modela za RT2 (slika lijevo) i RT4 (slika desno).....	38
Slika 35 Polje brzine klasičnog solarnog kolektora kod semi transparent modela za RT2 (slika lijevo) i RT4 (slika desno).....	39
Slika 36 Temperaturno polje polimernog solarnog kolektora (prvi model) za RT1 (slika lijevo) i RT4 (slika desno).....	39
Slika 37 Polje brzine polimernog solarnog kolektora (prvi model) za RT1 (slika lijevo) i RT4 (slika desno)	40
Slika 38 Temperaturno polje polimernog solarnog kolektora (drugi model) za RT1 (slika lijevo) i RT4 (slika desno).....	40

Slika 39 Polje brzine polimernog solarnog kolektora (drugi model) za RT1 (slika lijevo) i RT4 (slika desno)	41
Slika 40 Učinkovitost kolektora određene numeričkim simulacijama za ljetni režim rada	42
Slika 41 Učinkovitost kolektora određene numeričkim simulacijama za zimski režim rada ..	42

POPIS TABLICA

Tablica 1 Konstrukcijski parametri [9], [10].....	18
Tablica 2 Svojstva pojedinih materijala korištenih u kolektoru [10]	18
Tablica 3 Pogonski parametri [10]	19
Tablica 4 Parametri krivulje učinkovitosti određene mjerenjima	20
Tablica 5 Radne točke za ljetni režim rada	20
Tablica 6 Radne točke za zimski režim rada.....	21
Tablica 7 Osnovne informacije o geometrijskoj mreži pločastog kolektora.....	32
Tablica 8 Osnovne informacije o mreži prvog modela polimernog solarnog kolektora.....	33
Tablica 9 Osnovne informacije o mreži drugog modela polimernog solarnog kolektora.....	35
Tablica 10 Učinkovitost sva tri tipa kolektora određene numeričkim simulacijama	42

POPIS OZNAKA

LATINIČNA SLOVA

Oznaka	Jedinica	Opis
A	m^2	Površina
a	-, m^2/s	Koeficijent apsorpcije, koeficijent temperaturne vodljivosti
B	m	Udaljenost između apsorbera i stakla
C_{spoj}	$W/(mK)$	Toplinska vodljivost spoja
c_p	$J/(kgK)$	Specifični toplinski kapacitet pri konstantnom tlaku
$d_{u,v}$	m	Unutarnji i vanjski promjer cijevi
F	-	Faktor učinkovitosti rebra
F'	-	Faktor učinkovitosti kolektora
F_r	-	Faktor odvođenja topline
f	-	Darcy-ev faktor trenja
f_i	m/s^2	Specifična masena sila u smjeru osi x_i
G	W/m^2	Apsorbirano sunčevo zračenje
g	m/s^2	Gravitacijsko ubrzanje
I	W/m^2	Intenzitet zračenja
L	m	Duljina kolektora
m	-	Faktor rebra
\dot{m}	kg/s	Maseni protok
n	-	Broj cijevi, refrakcijski indeks
p	Pa	Tlak
\dot{Q}	W	Korisni toplinski tok predan radnom fluidu
q	W/m^2	Gustoća toplinskog toka
q_m	$kg/(sm^2)$	Maseni protok vode po m^2 kolektora
q_{sun}	W/m^2	Gustoća toplinskog toka dozačene energije sunca
r	m^2K/W	Specifični toplinski otpor
\vec{r}	-	Vektor položaja pojedine točke u prostoru
T	K	Termodinamička temperatura
T_{neba}	K	Temperatura neba
T_{ok}	K	Temperatura okoliša
U_b	$W/(m^2K)$	Koeficijent prolaza topline preko dna kolektora
U_e	$W/(m^2K)$	Koeficijent prolaza topline preko rubnih ploha kolektora
U_t	$W/(m^2K)$	Ukupni koeficijent prolaza topline
U_t	$W/(m^2K)$	Koeficijent prolaza topline preko vrha kolektora
u_i	m/s	Brzina fluida u smjeru osi x_i
W	m	Razmak između osi cijevi

w	m/s	Brzina vjetra
x_i	m	Prostorna koordinata

GRČKA SLOVA

Oznaka	Jedinica	Opis
α	W/(m ² K)	Koeficijent prijelaza topline
α_{cijev}	W/(m ² K)	Koeficijent prijelaza topline s cijevi na vodu
β	°	Nagib kolektora
β'	1/K	Volumetrički koeficijent ekspanzije
δ	m	Debljina stijenke
$\delta_{i,j}$	-	Kronecker-ov operator
ε	-	Koeficijent emisije
η	-	Učinkovitost kolektora
η_0	-	Učinkovitost kolektora kada je temperatura vode jednaka temperaturi zraka
Θ	°	Polarni kut
λ	W/(mK)	Toplinska vodljivost
ρ	kg/m ³	Gustoća
σ	W/(m ² K ⁴)	Steffan-Boltzmann-ova konstanta
σ_s	-	Koeficijent raspršivanja
μ	Pa s	Dinamička viskoznost
μ_v	Pa s	Koeficijent volumenske viskoznosti
ν	m ² /s	Kinematička viskoznost
τ	-	Koeficijent propusnosti
φ	°	Azimut
ϑ	°C	Temperatura
$\vec{\Omega}$	-	Vektor smjera širenja zračenja

INDEKSI

Oznaka	Opis
aps	Apsorber
iz	Izlazno
izo	Izolacija
k	Konvekcija
v	Voda
sr	Srednje
st	Staklo

ul	Ulazno
z	Zrak, zračenje
∞	Izvan graničnog sloja

BEZDIMENZIJSKE ZNAČAJKE

Oznaka	Jedinica	Opis
Gz		Graetz-ov broj
Nu		Nusselt-ov broj
Pr		Prandtl-ov broj
Ra		Rayleigh-ov broj
Re		Reynolds-ov broj

SAŽETAK

U ovom radu je napravljen model za određivanje toplinskih karakteristika toplovodnog solarnog kolektora izrađenog od polimera kao dijela optimizacije i izrade prototipa. Rad je proveden u nekoliko faza. Na početku je dan pregled literature vezane uz dosadašnji razvoj polimernih kolektora. U prvoj fazi je razvijen analitički model klasičnog pločastog solarnog kolektora. Za verifikaciju analitičkog modela koristili su se rezultati ispitivanja koje je proveo Laboratorij za toplotu i toplinske uređaju. U sklopu prve faze, prikazan je i utjecaj konstrukcijskih, pogonskih i optičkih svojstava na učinkovitost kolektora. Analitički model je razvijen pomoću programskog paketa Matlab. U drugoj fazi izrađen je numerički model za određivanje toplinskih karakteristika klasičnog pločastog solarnog kolektora. Numerički model je verificiran pomoću dobivenih rezultata pomoću analitičkog modela i eksperimentalnih podataka. Za provedbu simulacija izmjene topline unutar kolektora korišten je programski paket Fluent. Na temelju iskustva iz dobivenih iz prve i druge faze, u trećoj fazi razvijen je model za određivanje toplinskih karakteristika toplovodnog solarnog kolektora izrađenog od polimera. Na temelju rezultata dobivenih numeričkim simulacijama polimernog kolektora, dane su smjernice za daljnje poboljšanje samog numeričkog modela, a time i poboljšanja toplinskih karakteristika polimernog kolektora.

Ključne riječi: polimerni solarni kolektor, numerička simulacija, izmjena topline unutar kolektora, Fluent

SUMMARY

In this paper, a model has been developed for determining the heat characteristics of a solar thermal collector made of polymers as part of optimization and prototype making. Work has been carried out in several phases. At the beginning, a review of literature related to the current development of polymer collectors is presented. In the first stage, an analytical model of a classic plate solar collector was developed. For the verification of the analytical model, the test results used by the Laboratory for Heat and Heat Equipment were used. As part of the first phase, the impact of structural, operating and optical properties on the efficiency of the collector is also shown. The analytical model was developed using the Matlab program package. In the second phase, a numerical model was developed for determining the thermal characteristics of a classical plate solar collector. The numerical model is verified by means of analytical model and experimental data. The Fluent software package was used for the simulation of heat transfer inside the collector. Based on the experience gained from the first and second phases, in a third phase model has been developed to determine the thermal characteristics of a solar thermal collector made of polymers. Based on the results obtained by the numerical simulations of the polymer collector, guidelines have been provided for further improvement of the numerical model itself and hence the improvement of the thermal characteristics of the polymer collector.

Key words: polymer solar collector, numerical simulation, heat exchange inside the collector, Fluent

1. UVOD

Klasični solarni kolektori za zagrijavanje vode koji se danas komercijalno koriste, već su dosegli visoke vrijednosti toplinske učinkovitosti. Značajnije poboljšanje toplinskih karakteristika moguće je ostvariti tek većim izmjenama konstrukcije. Prepreka širem korištenju solarnih kolektora je i relativno visoka cijena zbog korištenja skupih materijala poput čelika, aluminijske i bakare. Korištenjem ovih materijala je također smanjena mogućnost značajnije izmjene konstrukcije. Iz tog razloga se razvoj solarne tehnologije sve više usmjerava na polimerne kolektore koje je moguće proizvesti po znatno nižoj cijeni uz jednostavniju primjenu konstrukcijskih izmjena. Kod ovakvog tipa kolektora, najveći je izazov kako riješiti problem deformacije, odnosno propadanja materijala pri povišenim temperaturama. Povišene temperature se javljaju u režimu rada kada je postignuta željena temperatura u akumulacijskom spremniku. U tom slučaju, radni fluid ne struji kroz kolektor te se energija sunčevog zračenja ne predaje radnom mediju, već se akumulira unutar kolektora, što dovodi do povećanja temperature pojedinih komponenti kolektora.

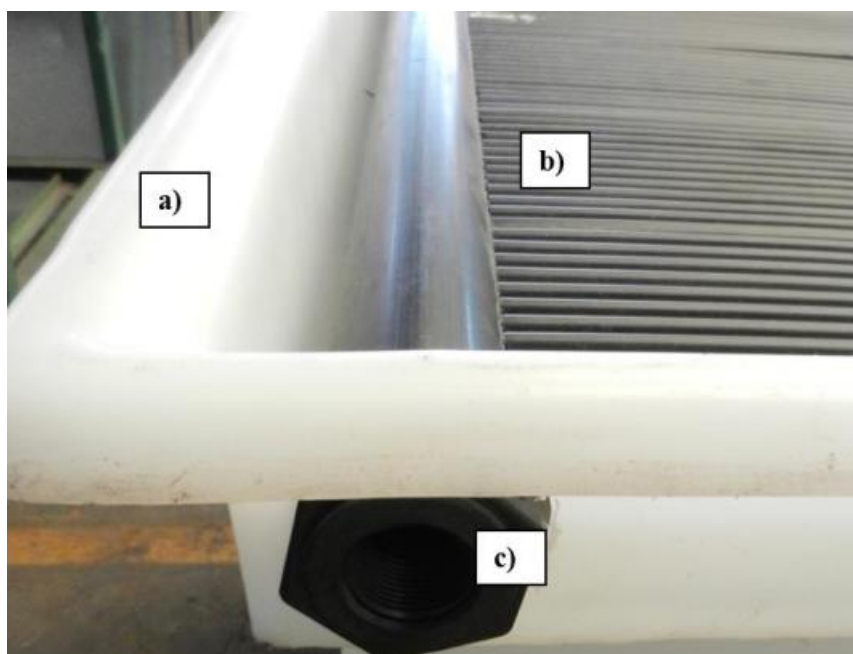
Cilj ovog rada je razviti model za određivanje toplinskih karakteristika novog tipa solarnog toplovodnog kolektora izrađenog od polimera, kao dijela postupka optimizacije i izrade prototipa. Prvi dio rada fokusirat će se na razvijanje analitičkog modela za proračun učinkovitosti klasičnog pločastog solarnog kolektora za proizvoljne radne parametre. Za verifikaciju analitičkog modela koristit će se rezultati ispitivanja koje je obavio Laboratorij za toplinu i toplinske uređaje. Nakon toga, potrebno je razviti numerički model istog kolektora koji će se usporediti s analitičkim modelom i rezultatima ispitivanja. U drugom dijelu rada će se na temelju iskustva iz modeliranja klasičnog solarnog kolektora, razviti model za određivanje toplinskih karakteristika novog tipa polimernog solarnog kolektora. Na temelju dobivenih rezultata, dati će se smjernice za izmjene konstrukcije i optičkih svojstava apsorbera i pokrova radi postizanja čim veće toplinske učinkovitosti te snižavanja temperature pojedinih dijelova kolektora kako ne bi došlo do njihove deformacije odnosno propadanja.

2. POLIMERNI SOLARNI KOLEKTOR

U ovom poglavlju dan je pregled literature vezan uz razvoj polimernih solarnih kolektora.

Danas korišteni klasični solarni kolektori koriste relativno skupe materijale, poput bakra, aluminija i čelika zbog čega je cijena pločastih solarnih kolektora i dalje relativno visoka. Korištenjem polimernih materijala prilikom izrade kolektora moguće je dalje sniziti cijenu kolektora čime bi se raširila njegova upotreba. Glavni nedostatak polimernih materijala su lošija toplinska i mehanička svojstva u usporedbi s klasičnim metalnim materijalima. Glavni izazov koji je potrebno riješiti je kako spriječiti degradaciju, odnosno propadanje materijala uslijed visokih temperatura uz zadržavanje ili poboljšanje toplinskih karakteristika. Degradacija polimernih materijala javlja se kod dugotrajne izloženosti temperaturi većoj ili jednakoj 100°C, što je znatno niže od maksimalnih temperatura koje se mogu pojaviti u kolektoru.

Danas na tržištu ne postoji komercijalno razvijen polimerni kolektor, uz izuzetak polimernih kolektora za zagrijavanje bazenske vode. Stoga se razvoj solarne tehnologije sve više usmjerava na razvijanje polimernih kolektora. U radu [1] je eksperimentalno ispitan sustav sa spremnikom vode i neostakljenim polimernim solarnim kolektorom.



Slika 1 Neostakljeni polimerni solarni kolektor [1]

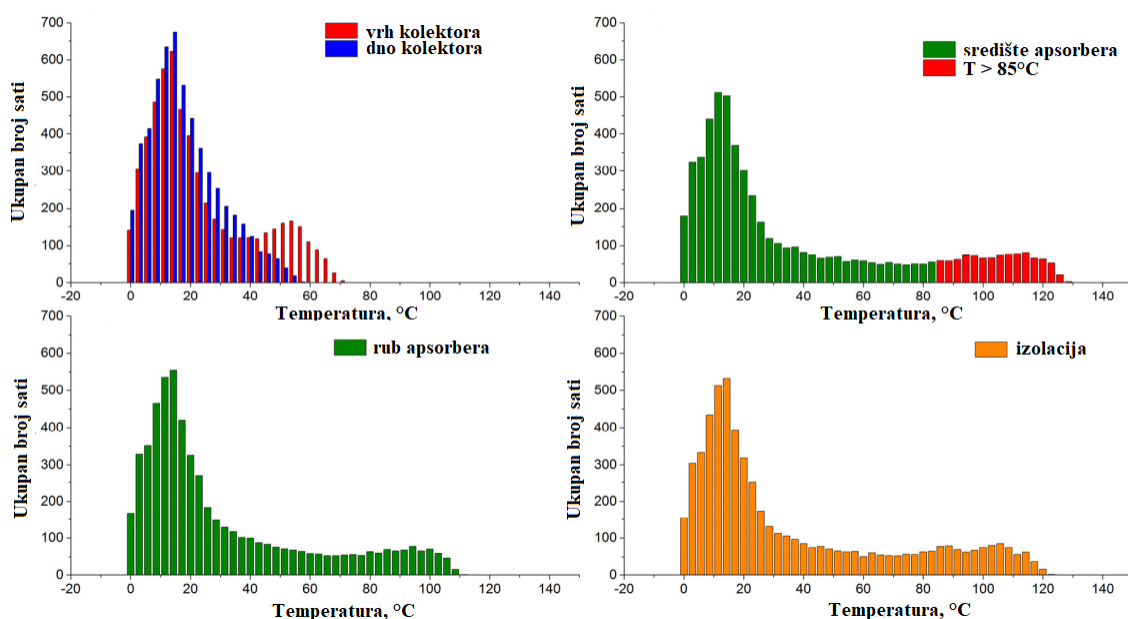
Na Slici 1 je prikazan neostakljeni polimerni kolektor. Dijelovi prikazani na slici su:

- a) kućište izrađeno od polietilena
- b) apsorber izrađen od polipropilena
- c) sabirnik cijevi

Ekspérimentom se utvrdilo kako su toplinske karakteristike ovog tipa grijača vode slične toplinskim karakteristikama klasičnih metalnih grijača vode. Uz sunčevo zračenje od 22 MJ/m^2 postignute su temperature vode od 60°C [1].

Dalje u radu [2] je pokazan solarni kolektor izrađen od kopolimera. Analitičkim putem se odredio utjecaj konstrukcijskih parametara na cjelokupni sustav, dok su se eksperimentalnim putem odredile toplinske karakteristike. Masa kolektora je smanjena za 50 % u odnosu na klasični solarni kolektor. Kolektor je ispitan za područje Mediterana i pokazalo se kako ovakav tip kolektora ima prosječnu godišnju učinkovitost od 56,5 % uz brzinu vjetra od 0 m/s i 49 % uz brzinu vjetra od 5 m/s [2].

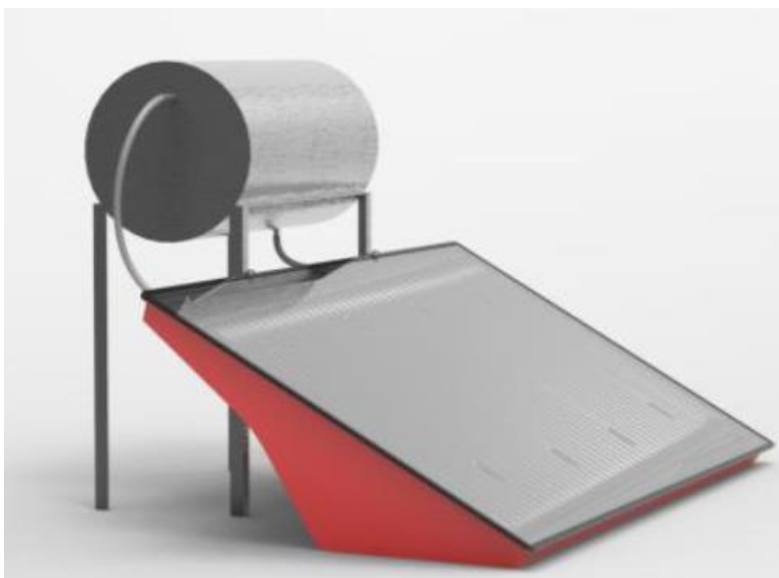
Ispitivanje polimernog solarnog kolektora u realnim radnim uvjetima provedeno je u [3]. Ispitivanje se fokusiralo na određivanje maksimalnih temperatura i toplinskih opterećenja za apsorber, budući da je taj dio toplinski najopterećeniji. Dva tipa pločastih kolektora su ispitana. Jedan tip sadrži apsorber izrađen od polifenilen sulfida, dok se u drugom tipu kolektora nalazi apsorber izrađen od polipropilena. Također, ispitivanja su provedena za tri različite lokacije, Njemačka, Španjolska i Izrael.



Slika 2 Rezultati ispitivanja polimernog solarnog kolektora [3]

Na Slici 2 su prikazani rezultati ispitivanja provedenih u Njemačkoj. Prikazana je učestalost pojavljivanja određenih temperatura na različitim dijelovima prvog tipa kolektora. Kritična temperatura za prvi tip kolektora iznosi 85°C , dok je za drugi tip kolektora definirana kritična temperatura od 60°C . Učestalija izloženost polimernog kolektora iznad ove temperature pospješuje degradaciju materijala. Broj sati kod kojih se pojavljuje vrijednost temperature iznad kritične iznosi 1004 h za prvi tip kolektora (lokacija ispitivanja Njemačka), dok je za drugi tip kolektora broj sati 205,8 h (lokacija ispitivanja Njemačka) [3].

U radu [4] je prikazana izvedba kolektora difuznog zračenja izrađenog od polimernih materijala.



Slika 3 Kolektor difuznog zračenja [4]

Na Slici 3 je prikazan model kolektora difuznog zračenja. Pokazalo se kako ovakav tip polimernog kolektora može dostići maksimalnu učinkovitost od 90% koju treba uzeti s rezervom budući da se radi o ostakljenom kolektoru. Također je pokazano da efikasnost kolektora drastično pada kada se dosegnu vrijednosti temperatura od 60°C [4].

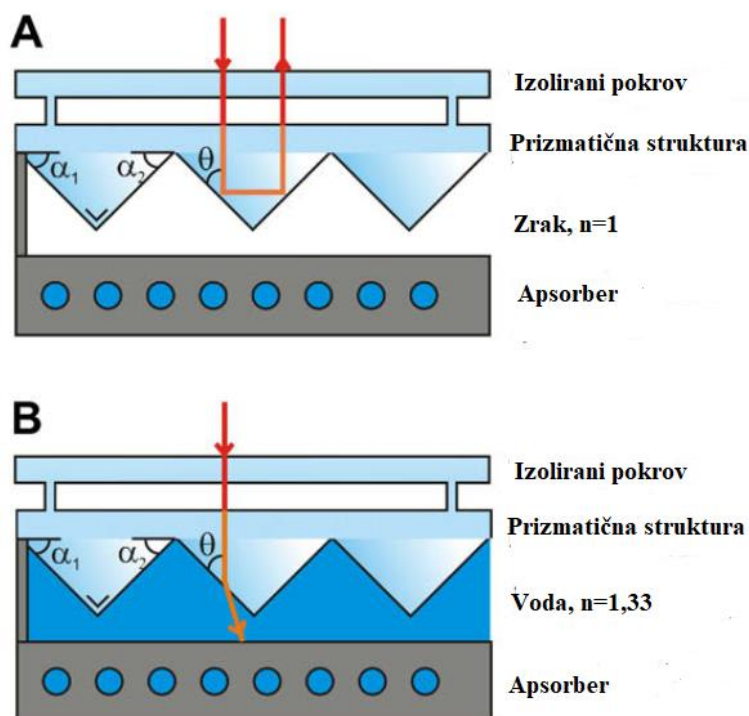
Iz prikazanih radova se može vidjeti kako postoji veliki potencijal za korištenje polimernih materijala u izradi solarnih kolektora. Problem koji je potrebno riješiti je zadržavanje ili poboljšanje toplinskih karakteristika. Moguće smanjenje efikasnosti se može opravdati nižim troškovima izrade, pri čemu i dalje ostaje problem degradacije materijala pri višim temperaturama. Problematična temperatura je tzv. temperatura stagnacije. Ta temperatura se javlja kada radni fluid ne struji kroz kanale. Takav režim rada se može javiti kada je postignuta maksimalno dozvoljena temperatura u spremniku tople vode (npr. 80°C radi zaštite pumpe) ili

kod nestanka struje. U klasičnim kolektorima te temperature mogu narasti i do 180°C . Kod tako visokih temperatura degradacija materijala nastupa u vrlo kratkom vremenu. U nastavku su prikazani radovi koje se bave problemima degradacije materijala uslijed pojave visokih temperatura, odnosno kako sniziti temperature unutar kolektora.

U radu [5] je predložena metoda pasivnog hlađenja pločastog solarnog kolektora. Metoda je ispitana numerički i eksperimentalno. Kod ovog kolektora se predlaže ugradnja kanala za strujanje zraka sa stražnje strane kolektora, uz regulacijski ventil. Ustanovljeno je da temperatura stagnacije doseže vrijednosti od 170°C dok se uz primjenu ove metode hlađenja temperatura mogu sniziti i do 120°C [5]. Temperatura stagnacije od 120°C je i dalje prevelika za polimerne solarne kolektore.

Autori su u [6] predložili korištenje termotropskih materijala čija propusnost u vidljivom spektru ovisi o temperaturi. Tako se može, u željenim režimima rada smanjiti propusnost za sunčevo zračenje i time sniziti temperature unutar kolektora. Uspjeli su postići sniženje propusnosti od 28% za raspon temperatura od 55°C do 60°C [6].

U [7] se predlaže korištenje prizmatičnih struktura pomoću kojih se može sniziti temperatura stagnacije. Princip rada se temelji na Snellius-ovom zakonu loma svjetlosti.



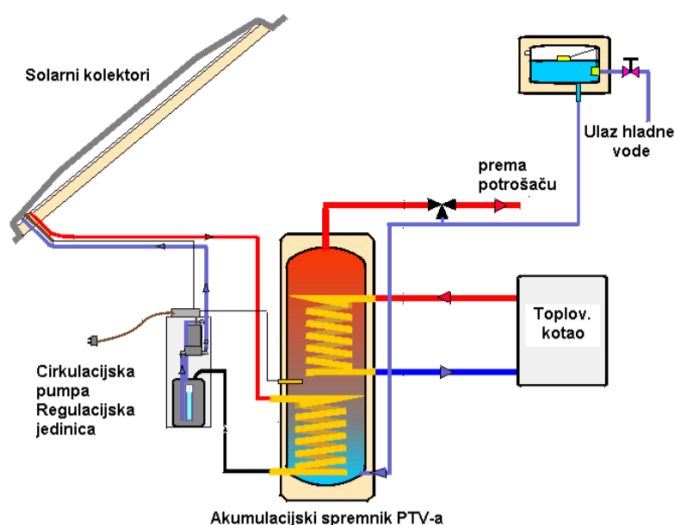
Slika 4 Kolektor s prizmatičnom strukturom [7]

Na Slici 4 je prikazan princip rada i model ispitivanog kolektora. Kada je između apsorbera i prizmatične strukture zrak (slika A), upadno sunčevo zračenje se uslijed totalne refleksije vraća nazad kroz pokrov (indeks refrakcije $n=1$). U slučaju kada se između prizmi i apsorbera nalazi voda (slika B), sunčevo zračenje se lomi pod određenim kutom i dalje prolazi prema apsorberu (indeks refrakcije $n=1,33$). Ispitivanja su provedena za zračenje od 300 W/m^2 i pokazalo se da temperature vrlo brzo dosežu vrijednosti od 150°C kada u kolektoru ne postoje prizmatične strukture dok je pomoću prizmatičnih struktura temperatura snižena na vrijednost od 60°C [7]. Autori u radu nisu ispitali utjecaj ovakve strukture na učinkovitost kolektora.

U nastavku rada je opisan matematički model korišten za proračun klasičnog kolektora.

3. PLOČASTI SOLARNI KOLEKTOR

Danas, najrasprostranjeniji oblik iskorištavanja sunčeve energije je u toplovodnim solarnim sustavima. Sunčeva energija se u većoj mjeri koristi za pripremu potrošne tople vode (PTV), dok se u manjoj mjeri koristi za grijanje prostora i zagrijavanje bazenske vode. Glavna komponenta toplovodnog solarnog sustava jest solarni kolektor. Jedan takav sustav, sa svim dijelovima prikazan je na Slici 5.

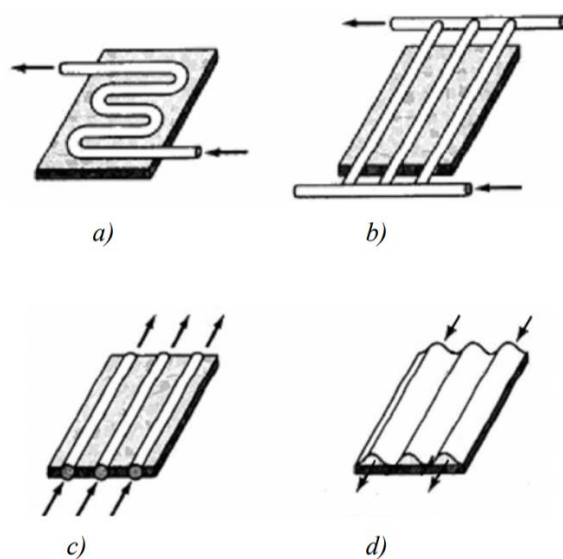


Slika 5 Toplovodni solarni sustav [8]

Uz solarni kolektor, ostali dijelovi ovog sustava su cirkulacijska pumpa, regulacija, spremnik PTV-a i pomoćni kotao. Uloga solarnog kolektora je prikupljanje sunčeve energije, koja se zatim predaje radnom fluidu te se na kraju preko izmjenjivača topline predaje akumulirana toplinska energija.

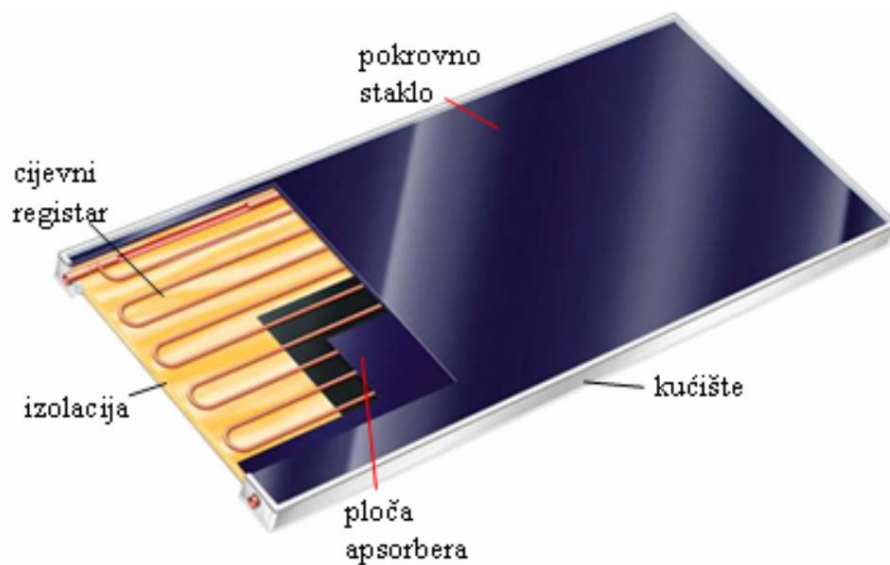
Danas na tržištu postoje razni tipovi solarnih kolektora. U solarnim toplovodnim sustavima, najviše se koriste pločasti kolektori, dok se u novije vrijeme sve više koriste i vakuumski kolektori. Razni tipovi pločastih kolektora prikazani su na Slici 6. Pločasti kolektori prikazani na slici su:

- a) cijevi u obliku „serpentine“ zavarene za ploču apsorbera
- b) paralelni cijevni registar zavaren za ploču apsorbera
- c) cijevi formirane u materijalu ploče apsorbera
- d) valoviti kanal zavaren za ploču apsorbera



Slika 6 Razne konstrukcijske izvedbe pločastih kolektora [8]

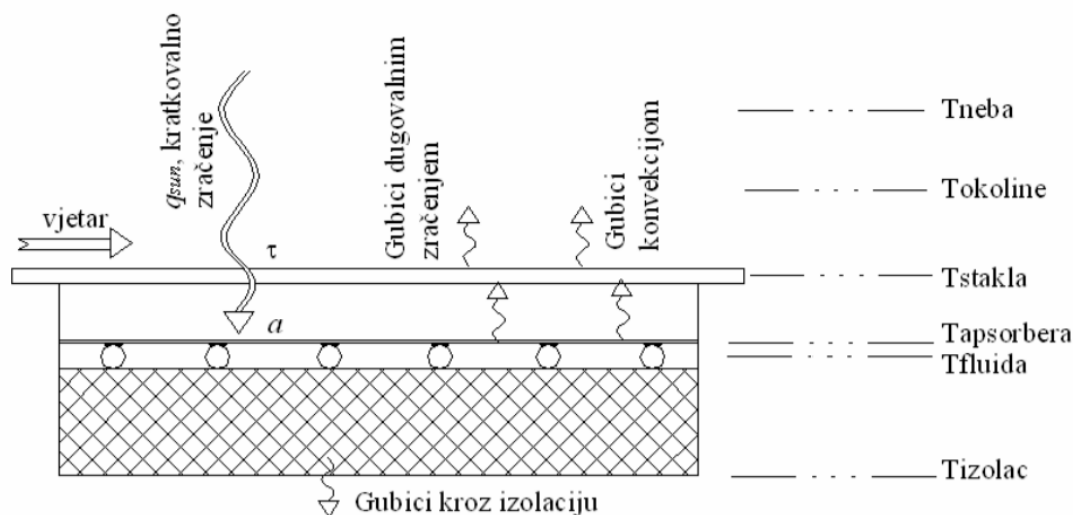
Prva masovnjia proizvodnja pločastih kolektora zabilježena je tijekom naftne krize 70-tih godina prošlog stoljeća. Od početka masovne proizvodnje, efikasnost kolektora znatno je poboljšana. To je dovelo do povećanja broja ukupno instaliranih kolektora kao i snižavanja njihove cijene. Osnovni dijelovi jednog tipičnog pločastog kolektora su pokrovno staklo, apsorber sunčevog zračenja, cijevni registar koji je zavaren na ploču apsorbera, izolacija i kućište. Pločasti kolektor sa svim osnovnim dijelovima prikazan je na Slici 7.



Slika 7 Pločasti solarni kolektor s osnovnim dijelovima [8]

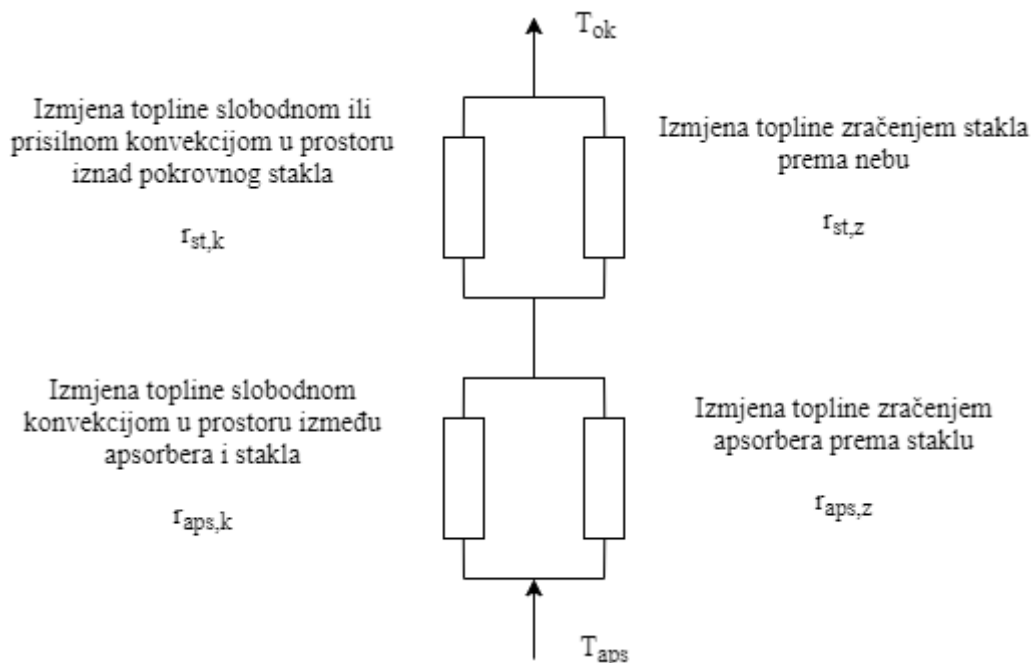
3.1. OSNOVNI MEHANIZMI IZMJENE TOPLINE

Shematski prikaz osnovnih mehanizma izmjene topline u pločastom kolektoru prikazan je na Slici 8.



Slika 8 Shematski prikaz izmjene topline u kolektoru [9]

Sunčevo zračenje, q_{sun} (I), pristiglo na površinu kolektora dijelom se gubi uslijed refleksije (koeficijent emisije stakla ε_{st}) i apsorpcije u staklu. Upadno zračenje koje je prošlo kroz pokrovno staklo faktora propusnosti τ_{st} , dijelom se apsorbira u premazu ploče apsorbera faktora apsorpcije a_{aps} , a dijelom se gubi refleksijom prema okolini kroz pokrovno staklo. Kompletно apsorbirana energija se ne uspije predati radnom fluidu. S ploče apsorbera, dio energije gubi se zračenjem prema pokrovnom staklu (koeficijent emisije premaza apsorbera ε_{aps}), a dio slobodnom konvekcijom na zrak iznad ploče apsorbera. Također, dio energije gubi se zračenjem stakla prema nebu kao i slobodnom ili prisilnom konvekcijom na okolišni zrak. Manji dio energije se gubi kroz izolaciju kolektora. Na kraju, energija se provodi kroz materijal cijevi gdje se konvekcijom predaje radnom fluidu koji struji unutar cijevi.



Slika 9 Prikaz toplinskih otpora u analogiji s električnim krugovima

3.2. PRORAČUN TOPLINSKIH GUBITAKA

Toplinski otpori, u analogiji s električnim krugovima su prikazani su Slici 9. Ovdje treba napomenuti kako je pri izradi matematičkog modela zanemareno provođenje kroz staklo. U nastavku su dani izrazi za izračun pojedinih toplinskih otpora.

3.2.1. Izmjena topline slobodnom konvekcijom u prostoru između apsorbера i stakla

Otpor izmjene topline slobodnom konvekcijom na zrak iznad apsorbера je recipročna vrijednost koeficijenta prijelaza topline. Koeficijent prijelaza topline se određuje iz izraza (3.1)

$$\frac{1}{r_{aps,k}} = \alpha_{aps,k} = \frac{Nu_z \cdot \lambda_z}{B} \quad (3.1)$$

gdje je λ_z toplinska provodnost zraka, B razmak između ploče apsorbера i pokrovnog stakla, a Nu_z Nusselt-ova značajka. Nusselt-ova značajka je definirana kao omjer konvektivnog i konduktivnog prijenosa topline i može se izračunati iz izraza (3.2)

$$Nu_z = 1 + 1,44 \cdot \left[1 - \frac{1708 \cdot \sin(1,8\beta)^{1,6}}{Ra \cdot \cos\beta} \right] \cdot \left[1 - \frac{1708}{Ra \cdot \cos\beta} \right]^+ + \left[\left(\frac{Ra \cdot \cos\beta}{5830} \right)^{1/3} - 1 \right]^+ \quad (3.2)$$

gdje je β nagib kolektora, a Ra , Rayleigh-ova značajka. Pozitivni eksponent u gornjoj jednadžbi znači da se uzimaju samo pozitivne vrijednosti za izraze u zagradama. Ako izrazi u zagradi poprime negativne vrijednosti, tada ti izrazi poprimaju vrijednost nula. Rayleigh-ova značajka se računa iz izraza (3.3)

$$Ra = \frac{g\beta'\Delta TB}{\nu a} \quad (3.3)$$

gdje je g gravitacijsko ubrzanje koje iznosi $9,81 \text{ m/s}^2$, β' volumetrički koeficijent ekspanzije, koji za idealni plin se može računati kao $\beta' = 1/T_z$, ΔT temperaturna razlika između dviju ploča, ν kinematička viskoznost zraka, dok je a mjera toplinske inercije. Sva svojstva zraka očitavaju se za srednju temperaturu zraka koja se računa kao srednja vrijednost temperatura dviju ploča.

3.2.2. *Izmjena topline zračenjem apsorbera prema staklu*

Otpor izmjeni topline zračenjem između apsorbera i stakla može se odrediti iz izraza (3.4)

$$\frac{1}{r_{aps,z}} = \alpha_{aps,z} = \frac{\sigma(T_{aps}^4 - T_{st}^4)}{\frac{1}{\varepsilon_{aps}} + \frac{1}{\varepsilon_{st}} - 1} \cdot \frac{1}{T_{aps} - T_{st}} \quad (3.4)$$

gdje je σ Stefan-Boltzmann-ova konstanta koja iznosi $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/(m}^2\text{K}^4)$, a ε_{aps} i ε_{st} su koeficijenti emisije apsorbera i donje strane pokrovnog stakla.

3.2.3. *Izmjena topline slobodnom ili prisilnom konvekcijom u prostoru iznad pokrovnog stakla*

Otpor izmjeni topline slobodnom ili prisilnom konvekcijom u prostoru iznad pokrovnog stakla se računa prema izrazu (3.5)

$$\frac{1}{r_{st,k}} = \alpha_{st,k} = \max[5; 2,8 + 3w] \quad (3.5)$$

gdje je w brzina vjetra, m/s. Minimalna vrijednost koeficijenta prijelaza topline je $5 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ što odgovara izmjeni topline slobodnom konvekcijom.

3.2.4. Izmjena topline zračenjem stakla prema nebu

Otpor izmjeni topline zračenjem između stakla i neba može se izračunati prema izrazu (3.6).

$$\frac{1}{r_{st,z}} = \alpha_{st,z} = \frac{\varepsilon_{st}\sigma(T_{st}^4 - T_{neba}^4)}{T_{st} - T_{ok}} \quad (3.6)$$

Koeficijent prijelaza topline zračenjem je sveden na temperaturnu razliku između stakla i okolišnog zraka čime se omogućuje jednostavno zbrajanje otpora izmjeni topline konvekcijom i zračenjem. Temperatura neba se procjenjuje prema izrazu (3.7). Kod izraza za izmjenu toplinu zračenjem potrebno je napomenuti da je vrijednosti temperatura potrebno uvrštavati u Kelvinima.

$$T_{neba} = T_{ok} - 6K \quad (3.7)$$

3.3. ODREĐIVANJE TEMPERATURE STAKLA

Nakon određivanja svih toplinskih otpora, pri čemu je otpor provođenju topline kroz staklo zanemaren zbog male debljine stakla, moguće je pristupiti određivanju temperature stakla. Koeficijent prolaza topline s apsorbera na okoliš, odnosno ukupni otpor može se odrediti prema izrazu (3.8).

$$U_t = \left(\frac{1}{\alpha_{aps,k} + \alpha_{aps,z}} + \frac{1}{\alpha_{st,k} + \alpha_{st,z}} \right)^{-1} \quad (3.8)$$

Gustoća toplinskog toka je jednaka s apsorbera na staklo i sa stakla na okoliš, a time i s apsorbera na okoliš. Prema tome, temperatura stakla se može izračunati iz izraza (3.9).

$$T_{st} = T_{aps} - \frac{U_t(T_{aps} - T_{ok})}{\alpha_{aps,k} + \alpha_{aps,z}} \quad (3.9)$$

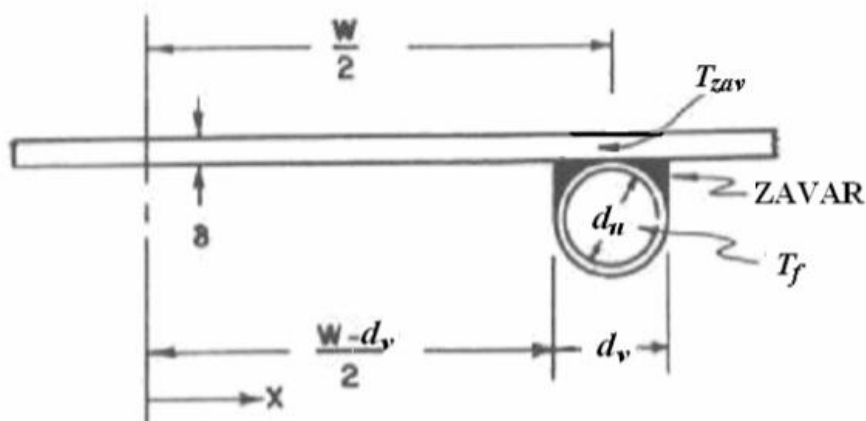
Proračun je iterativan budući da su u ovom trenutku nepoznate temperature ploče apsorbera i stakla. Također, koeficijenti prijelaza topline su ovisni o temperaturi stakla. U nastavku će biti pokazan postupak određivanja temperature apsorbera.

3.4. POSTUPAK ODREĐIVANJA SREDNJE TEMPERATURE VODE I APSORBERA

U ovom dijelu će biti dani izrazi pomoću kojih je moguće odrediti srednju temperaturu ploče apsorbera, kao i srednju temperaturu vode koja struji unutra cijevi.

3.4.1. Faktor učinkovitosti rebra

Prostor između dviju cijevi se može promatrati kao rebro. Također, cijevi djeluju kao toplinski ponori na ploči apsorbera što za posljedicu ima nejednoliku raspodjelu temperature po površini kolektora. Jedan takav segment je prikazan na Slici 10.



Slika 10 Prikaz cijevi i rebra [9]

Određivanje raspodjele temperature na rebu temelji se na rješavanju diferencijalne jednadžbe izmjene topline na segmentu rebra Δx jedinične širine u smjeru strujanja, pri čemu se zanemaruju gubici kroz izolaciju. Rješavanjem diferencijalne jednadžbe rebra dobiva se izraz (3.10) za faktor učinkovitosti rebra

$$F = \frac{\tanh[m(W - d_v)/2]}{m(W - d_v)/2} \quad (3.10)$$

gdje je W razmak između dviju cijevi, d_v vanjski promjer cijevi. Veličina m je pomoćna varijabla, koja se određuje iz jednadžbe (3.11)

$$m = \sqrt{\frac{U_l}{\lambda_{aps} \delta_{aps}}} \quad (3.11)$$

gdje su λ_{aps} i δ_{aps} toplinska vodljivost i debljina apsorbera. Ukupni koeficijent prolaza topline sa svih površina kolektora U_l određuje se prema izrazu (3.12).

$$U_l = U_t + U_b + U_e \quad (3.12)$$

Postavljanjem izolacije s donje strane kolektora smanjuju se gubici s donje strane kolektora. Koeficijent prolaza topline s donje strane kolektora računa se prema jednadžbi (3.13)

$$U_b = \frac{\lambda_{izo}}{\delta_{izo}} \quad (3.13)$$

gdje su λ_{izo} i δ_{izo} toplinska vodljivost i debljina izolacije postavljene s donje strane kolektora. Za većinu slučajeva koeficijent prolaza topline na bočnim plohama kolektora je teško izračunati. Zbog malog udjela u ukupnim gubitcima, koeficijent prolaza topline na bočnim plohama kolektora se grubo procjenjuje kao jednodimenzijski prolaz topline s rubnih površina kolektora. Koeficijent prolaza topline s rubnih ploha kolektora, sveden na površinu apsorbera računa se prema izrazu (3.14)

$$U_e = \frac{U_b A_e}{A_{aps}} \quad (3.14)$$

gdje su A_e i A_{aps} površine bočnih ploha i apsorbera.

3.4.2. Faktor efikasnosti kolektora i faktor odvođenja topline

Nakon određivanja faktora učinkovitosti rebra, moguće je pristupiti određivanju faktora efikasnosti kolektora i faktora odvođenja topline. Kako bi bilo moguće odrediti faktor efikasnosti kolektora i faktor odvođenja topline potrebno je odrediti koeficijent prijelaza topline unutar cijevi.

Za slučaj laminarnog strujanja kroz cijev, Nusselt-ova značajka se može izračunati iz jednadžbe (3.15).

$$Nu_v = 3,657 - \frac{0,0668 Gz^{1/3}}{0,04 + Gz^{-2/3}} \quad (3.15)$$

Graetz-ova značajka se određuje iz izraza (3.16)

$$Gz = RePr \frac{d_u}{L} \quad (3.16)$$

gdje su Re i Pr Reynolds-ova i Prandtl-ova značajka, d_u unutarnji promjer cijevi i L duljina cijevi. Za slučaj da je strujanje turbulentno, odnosno Reynolds-ova značajka veća od 2300, Nusselt-ova značajka se određuje prema jednadžbi (3.17)

$$Nu_v = \frac{\left(\frac{f}{8}\right) (Re - 1000) Pr}{1,07 + 12,7 \sqrt{\frac{f}{8}} (Pr^{2/3} - 1)} \quad (3.17)$$

gdje je f Darcy-jev faktor trenja i računa se iz jednadžbi (3.18).

$$f = (0,79 \ln Re - 1,64)^{-2} \quad (3.18)$$

Na kraju, koeficijent prijelaza topline se određuje prema izrazu (3.19).

$$\alpha_{cijev} = \frac{Nu_v \cdot \lambda_v}{d_u} \quad (3.19)$$

Ovdje treba napomenuti da se sva svojstva vode uzimaju za srednju temperaturu vode, čiji postupak računanja će biti pokazan u nastavku.

Faktor efikasnosti kolektora predstavlja odnos između stvarno predane topline fluidu i topline koja bi se predala fluidu, ako bi površina apsorbera bila na temperaturi koja je jednaka temperaturi vode unutar cijevi te se određuje iz jednadžbe (3.20)

$$F' = \frac{\frac{1}{U_l}}{W \left\{ \frac{1}{U_l [d_v + (W - d_v) F]} + \frac{1}{C_{spoj}} + \frac{1}{\pi d_u \alpha_{cijev}} \right\}} \quad (3.20)$$

gdje je C_{spoj} toplinska vodljivost spoja. Faktor odvođenja topline F_r uzima u obzir promjenjivost temperature fluida i računa se prema izrazu (3.21)

$$F_r = \frac{\dot{m} c_{p,v}}{A_{aps} U_l} \left[1 - \exp \left(- \frac{A_{aps} U_l F'}{\dot{m} c_{p,v}} \right) \right] \quad (3.21)$$

gdje je \dot{m} ukupni maseni protok vode kroz kolektor. Sada se može definirati jednadžba apsorbiranog korisnog toplinskog toka, izraz (3.22)

$$\dot{Q} = A_{aps} F_r [I \tau_{st} a_{aps} - U_l (\vartheta_{v,ul} - \vartheta_{ok})] \quad (3.22)$$

gdje je $\vartheta_{v,ul}$ ulazna temperatura vode. Nakon određivanja korisnog toplinskog toka može se pristupiti određivanju srednje temperature vode i apsorbera.

3.4.3. Određivanje srednjih temperatura

Srednja temperatura vode koja struji unutar kolektora se određuje iz jednadžbe (3.23), dok se srednja temperatura ploče apsorbera određuje iz izraza (3.24).

$$\vartheta_{v,sr} = \vartheta_{v,ul} + \frac{\dot{Q}}{A_{aps} U_l F_r} \left(1 - \frac{F_r}{F'} \right) \quad (3.23)$$

$$\vartheta_{aps,sr} = \vartheta_{v,ul} + \frac{\dot{Q}}{A_{aps} U_l F_r} (1 - F_r) \quad (3.24)$$

Kako je napomenuto prije, proračun je iterativan zbog ovisnosti koeficijenata prijelaza topline o temperaturi stakla koja ovisi o temperaturi apsorbera. Postupak rješavanja analitičkog modela solarnog kolektora je prikazan na Slici 11. Nakon uspješno provedenog izračuna srednjih temperatura vode, apsorbera i stakla moguće je odrediti izlaznu temperaturu vode, kao i učinkovitost kolektora. Izlazna temperatura vode se određuje iz izraza (3.25).

$$\vartheta_{v,iz} = \vartheta_{v,ul} + \frac{\dot{Q}}{\dot{m}c_{p,v}} \quad (3.25)$$

3.5. UČINKOVITOST KOLEKTORA

Učinkovitost kolektora predstavlja omjer korisne topline predane fluidu i ukupno apsorbiranog sunčevog zračenja te se računa prema jednadžbi (3.26).

$$\eta = \frac{\dot{Q}}{GA_{aps}} \quad (3.26)$$

Krivulja učinkovitosti dobivena analitičkim proračunom je parametarska, i prikazana je u ovisnosti o omjeru razlike temperatura vode i okoliša i upadnog sunčevog zračenja. Učinkovitost kolektora određena mjerenjima, određuje se prema izrazu (3.27)

$$\eta = \eta_0 - b_1 \frac{\Delta\vartheta}{I} - b_2 \left(\frac{\Delta\vartheta}{I}\right)^2 \quad (3.27)$$

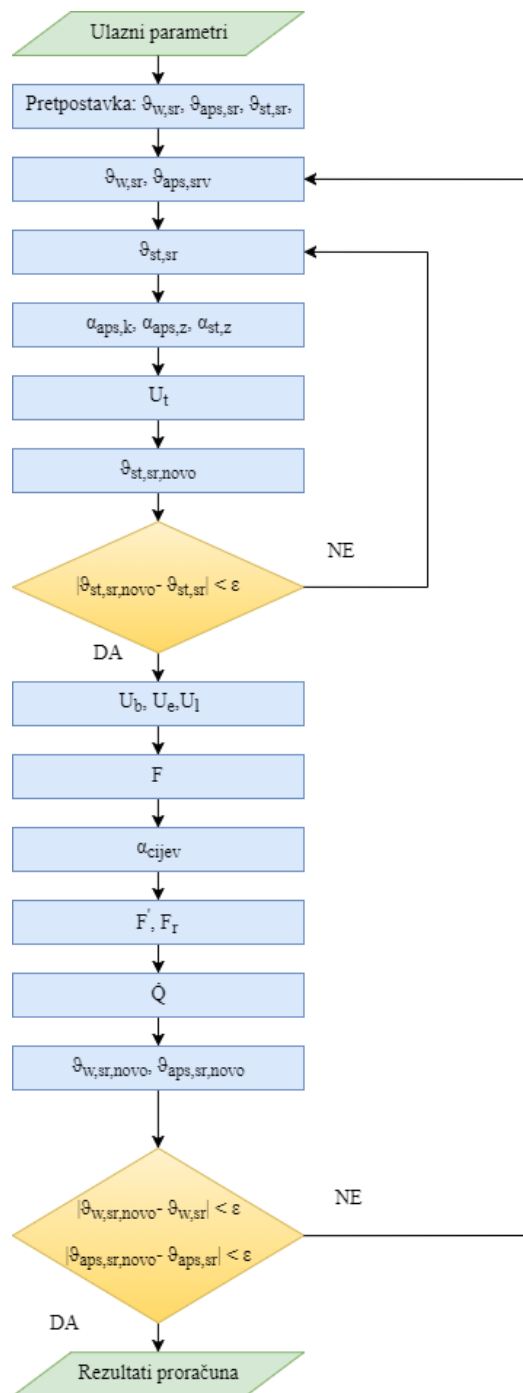
gdje je η_0 efikasnost kolektora za slučaj kada su okolišna temperatura i srednja temperatura vode jednake, i određuje se iz rezultata mjerenja. Parametri b_1 i b_2 određuju se metodom najmanjih kvadrata iz krivulje dobivene regresijskom analizom. Izraz (3.27) vrijedi za jednu vrijednost sunčevog zračenja I . Ako se uvedu parametri a_1 i a_2 , gore navedeni izraz se može preformulirati u izraz (3.28).

$$\eta = \eta_0 - a_1 \frac{\Delta\vartheta}{I} - a_2 \left(\frac{\Delta\vartheta}{I}\right)^2 \quad (3.28)$$

Konstante a_1 i a_2 se definiraju prema izrazu (3.29).

$$a_1 = b_1; \quad a_2 = \frac{b_2}{I} \quad (3.29)$$

Ovako definirana učinkovitost kolektora (jednadžba (3.28)) vrijedi za proizvoljnu vrijednost sunčevog zračenja I .



Slika 11 Blok dijagram rješavanja matematičkog modela solarnog kolektora

Prilikom rješavanja ovog modela potrebno je zadovoljiti dva uvjeta. Prvi uvjet kaže da je gustoća toplinskog toka jednaka s apsorbera na staklo i sa stakla na okoliš (jednadžba (3.9)). Drugi uvjet, koji je provjeren naknadno, kaže da je suma gubitaka topline s apsorbera jednaka razlici upadnog sunčevog zračenja, G i korisno predane topline radnom fluidu koja se određuje prema izrazu (3.22). Prilikom rješavanja modela su zadovoljena oba uvjeta.

4. REZULTATI ANALITIČKOG PRORAČUNA SOLARNOG KOLEKTORA

U ovom poglavlju prikazani su rezultati dobiveni rješavanjem matematičkog modela pločastog solarnog kolektora pokazanog u prethodnom poglavlju. Krivulje učinkovitosti su određene za dva režima rada, ljetni i zimski. Također, prikazan je utjecaj konstrukcijskih i pogonskih parametara kao i svojstava materijala na efikasnost kolektora. Kako je spomenuto prije, krivulja efikasnosti kolektora je prikazana u ovisnosti o omjeru razlike srednje temperature vode i okolišne temperature i intenziteta zračenja. Također, prikazani su i izračunati parametri za četiri proizvoljno odabrane radne točke. Za te radne točke bit će provedena usporedba rezultata dobivenih pomoću numeričkog modela solarnog kolektora.

4.1. UČINKOVITOST KOLEKTORA U LJETNOM I ZIMSKOM REŽIMU RADA

U Tablici 1 su prikazani korišteni konstrukcijski parametri. Ti parametri su konstantni i ne mijenjaju se za vrijeme rada kolektora.

Tablica 1 Konstrukcijski parametri [9], [10]

Debljina pokrovnog stakla, δ_{st} , mm	3,2
Udaljenost stakla od apsorbera, B , mm	21
Duljina cijevi, L , m	1,95
Udaljenost između dvije cijevi, W , mm	100
Promjer cijevi, d_v/d_u , mm	8/7
Debljina ploče apsorbera, δ_{aps} , mm	0,4
Debljina izolacije, δ_{izo} , mm	50
Broj cijevi, n , -	10
Širina zavora, mm	2,2

Svojstva pokrovnog stakla, apsorbera i premaza apsorbera prikazani su u Tablici 2 dok su u Tablici 3 prikazani pogonski parametri.

Tablica 2 Svojstva pojedinih materijala korištenih u kolektoru [10]

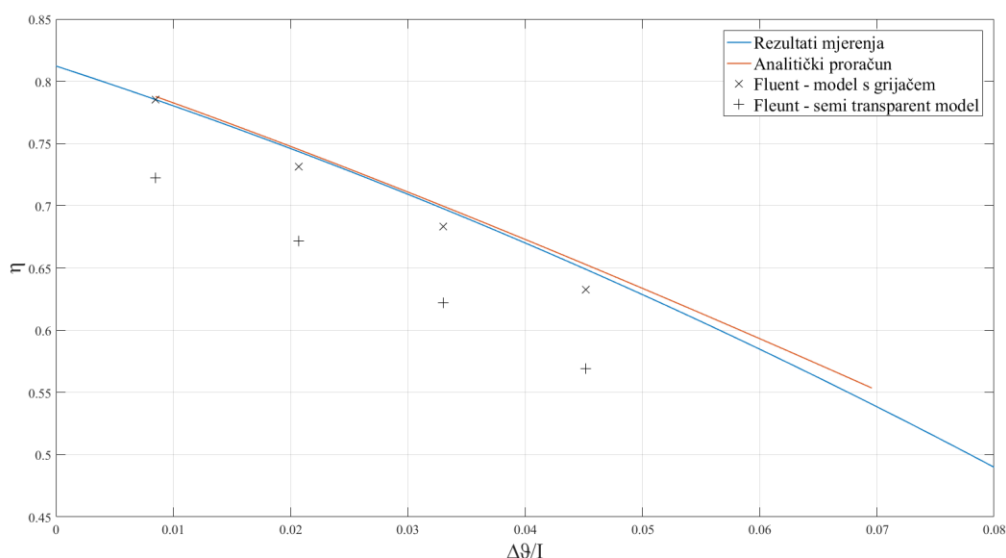
Materijal apsorbera, bakar	
Toplinska vodljivost, λ_{aps} , W/(mK)	386,7
Faktor apsorpcije premaza apsorbera, a_{aps} , -	0,95
Koeficijent emisije premaza apsorbera, ϵ_{aps} , -	0,106
Materijal pokrova, staklo	
Faktor propusnosti stakla, τ_{st} , -	0,9
Koeficijent emisije stakla, ϵ_{st} , -	0,88

Materijal izolacije, prošireni polistiren 15	
Toplinska vodljivost, λ_{izo} , W/(mK)	0,04
Spoje bakrene cijevi i ploče apsorbira	
Toplinska vodljivost spoja, C_{spoj} , W/(mK)	100

Tablica 3 Pogonski parametri [10]

Nagib kolektora, β , °	45
Maseni protok vode po m ² kolektora, q_m , kg/(sm ²)	0,02
Brzina vjetra, w , m/s	4

Ulazna temperatura vode se mijenja u određenom intervalu kako bi se mogla prikazati parametarska krivulja učinkovitosti kolektora. Sunčevo zračenje i temperatura okoliša ovise o tome radi li se o ljetnom režimu rada (800 W/m² i 27°C) ili zimskom režimu rada (400 W/m² i 4°C).



Slika 12 Krivulje učinkovitosti kolektora za ljetni režim rada

Na Slici 12 su prikazane krivulje učinkovitosti određene eksperimentalnim i analitičkim putem. Iz slike se vidi gotovo savršeno poklapanje matematičkog modela i eksperimentalnih rezultata pri manjim vrijednostima $\Delta T/I$. Odstupanja su veća kako raste vrijednost $\Delta T/I$. Parametarska krivulja učinkovitosti dobivena na temelju rezultata mjerenja vrijedi za parametre b_1 i b_2 prikazanim u Tablici 4. U toj tablici su također dani parametri a_1 i a_2 koji vrijede za proizvoljnu vrijednost sunčevog zračenja I . Na dijagramu su također prikazane učinkovitosti određene pomoću numeričkog modela klasičnog kolektora. Testirana su dva modela, model u kojem se

sunčevo zračenje modeliralo kao toplinski izvor u vrhu apsorbera, pokazalo je dobro poklapanje s rezultatima analitičkog proračuna i rezultatima mjerenja. Drugi model, *semi transparent* model, je pokazao veliko odstupanje od modela s grijačem. Odstupanja iznose 5 – 6 %. Za analizu učinkovitosti polimernog kolektora odabran je model s grijačem. Korišteni numerički modeli su objašnjeni kasnije u radu.

Tablica 4 Parametri krivulje učinkovitosti određene mjerenjima

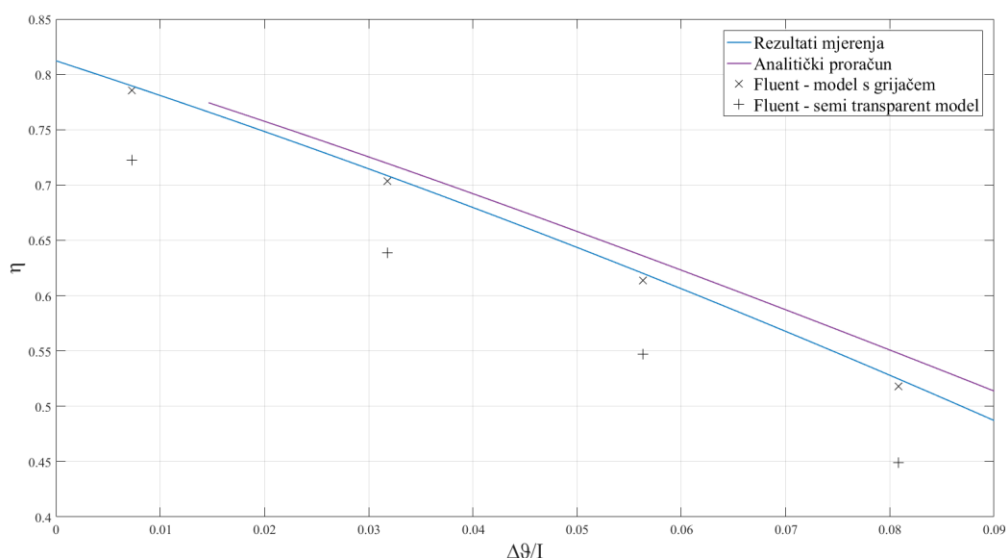
b_1	3,07667
b_2	11,90028
a_1	3,07667
a_2	0,01488
η_0	0,81226

U Tablici 5 su prikazani parametri za proizvoljno odabrane radne točke u ljetnom režimu rada.

Tablica 5 Radne točke za ljetni režim rada

	RT1	RT2	RT3	RT4
$\vartheta_{v,ul}, ^\circ\text{C}$	30,00	40,00	50,00	60,00
$\vartheta_{st,sr}, ^\circ\text{C}$	28,10	29,79	31,56	33,40
$\vartheta_{aps,sr}, ^\circ\text{C}$	44,14	53,26	62,37	71,46
$\vartheta_{\infty,sr}$	36,12	41,52	46,96	52,43
$\vartheta_{v,sr}, ^\circ\text{C}$	33,79	43,59	53,37	63,14
$\alpha_{cijev}, \text{W}/(\text{m}^2\text{K})$	404,29	411,14	417,16	422,39
$\eta, \%$	78,78	74,50	69,99	65,28
Mjereno, %	78,52	74,35	69,78	64,89
Fluent – model s grijačem, %	77,71	73,13	68,34	63,24
Fluent – semi transparent model, %	72,23	67,15	62,21	56,91

Iz tablice se može vidjeti kako se učinkovitosti određene analitičkim proračunom i eksperimentalnim i numeričkim putem (model s grijačem) poklapaju unutar 2%. Također, su dane temperature pojedinih elemenata solarnog kolektora kao i koeficijent prijelaza topline s cijevi na vodu. Ovi podaci su kasnije korišteni prilikom izrade numeričkog modela.



Slika 13 Krivulje učinkovitosti kolektora za zimski režim rada

Na Slici 13 su prikazane krivulje učinkovitosti određene analitičkim i eksperimentalnim putem za zimski režim rada. Krivulja temeljena na rezultatima mjerenja određena je pomoću koeficijenata a_1 i a_2 definiranim u Tablici 4. U zimskom režimu rada (Tablica 6), odstupanja krivulje učinkovitosti određene analitičkim proračunom su nešto veća nego u ljetnom režimu rada. Kao i kod ljetnog režima rada, ta odstupanja su manja pri manjim vrijednostima $\Delta\theta/I$ i ona rastu kako raste vrijednost $\Delta\theta/I$. Kod zimskog režima rada također dolazi do dobrog poklapanja krivulja učinkovitosti koje su određene numeričkim (model s grijačem), analitičkim i eksperimentalnim putem.

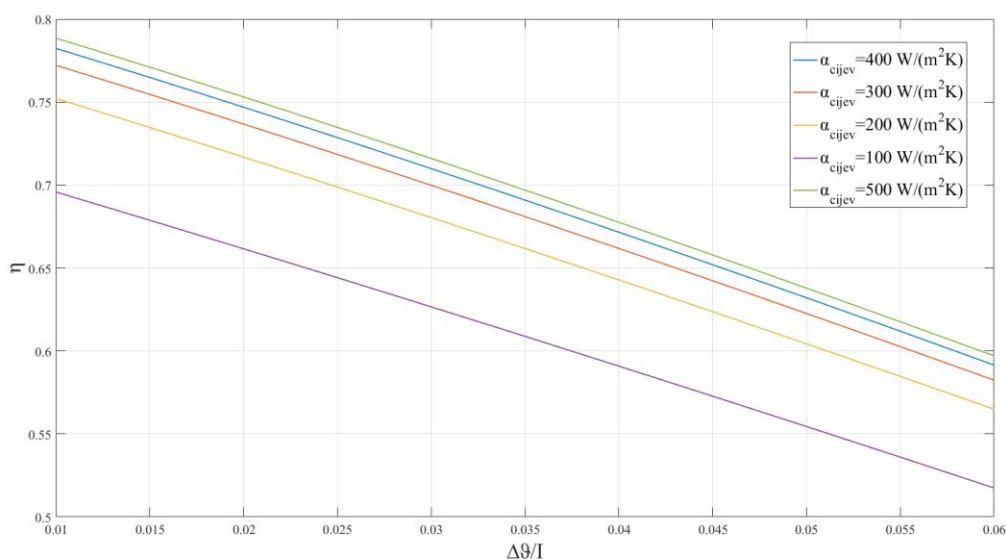
Tablica 6 Radne točke za zimski režim rada

	RT1	RT2	RT3	RT4
$\vartheta_{v,ul}, ^\circ\text{C}$	5,00	15,00	25,00	35,00
$\vartheta_{st,sr}, ^\circ\text{C}$	4,00	5,55	7,29	9,12
$\vartheta_{aps,sr}, ^\circ\text{C}$	12,37	21,57	30,75	39,91
$\vartheta_{z,sr}$	8,18	13,56	19,02	24,51
$\vartheta_{v,sr}, ^\circ\text{C}$	6,91	16,73	26,53	36,32
$\alpha_{cijev}, \text{W}/(\text{m}^2\text{K})$	380,66	390,17	398,64	406,14
$\eta, \%$	79,73	71,94	63,59	54,79
Mjereno $\eta, \%$	78,95	70,84	62,02	52,48
Fluent – model s grijačem $\%$	78,55	70,32	61,39	51,80
Fluent – semi transparent model, $\%$	72,26	63,84	54,73	44,92

Iz tablice se može vidjeti kako se učinkovitosti određene analitičkim proračunom, eksperimentalnim i numeričkim putem poklapaju unutar 3%. Kao i za ljetni režim rada, prikazani su parametri radnih točaka koji će kasnije biti korišteni u numeričkom modelu promatranog pločastog kolektora.

4.2. PARAMETARSKA ANALIZA KOLEKTORA

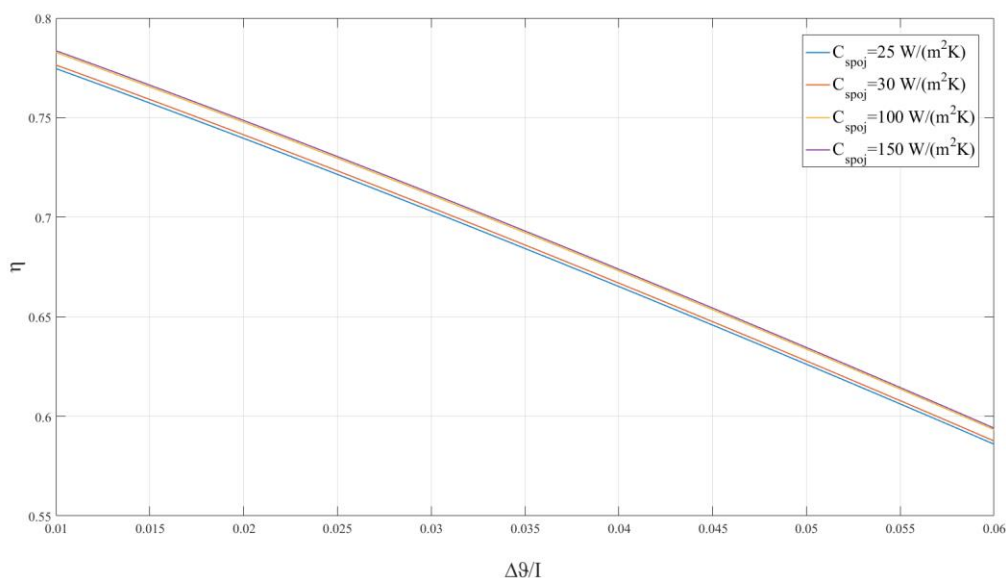
Na Slici 14 je prikazan utjecaj koeficijenta prijelaza topline s cijevi na vodu na učinkovitost kolektora. U realnim pogonski uvjetima moguć je ulazak zraka u dio kruga s vodom ili do onečišćenja vode. Kod visokih vrijednosti koeficijenata prijelaza topline (300-500 W/(m²K)) vidi se blagi pad učinkovitosti. Kod nižih koeficijenata prijelaza topline (200 W/(m²K) i manje) vidi se drastičan pad učinkovitosti te je iz toga razloga potrebno osigurati dobar odvođenje topline s cijevi na vodu. Vrijednosti koeficijenta prijelaza topline određene analitičkim proračunom kreću se između 380 i 420 W/(m²K).



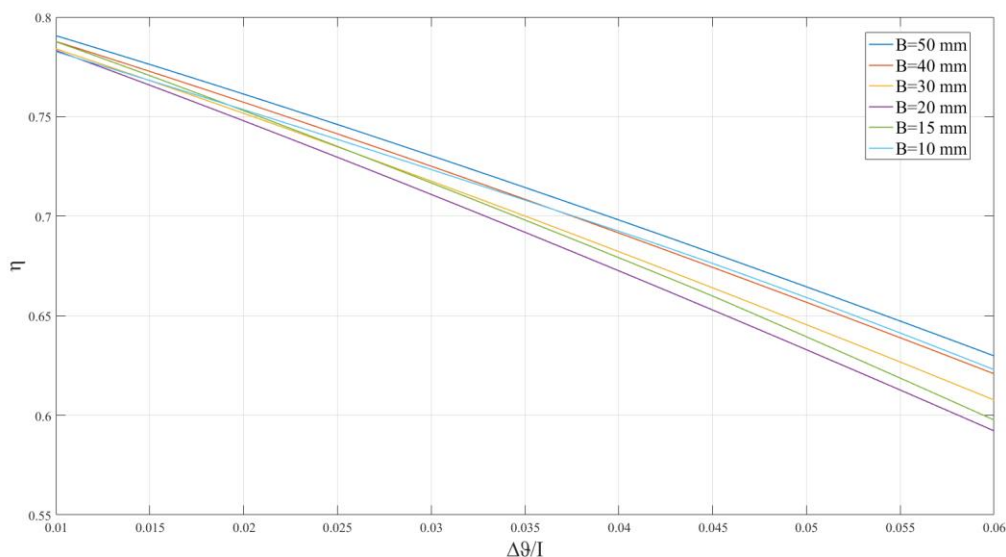
Slika 14 Utjecaj koeficijenta prijelaza topline s cijevi na vodu

Na Slici 15 je prikazan utjecaj vodljivosti spoja apsorbera i cijevi na učinkovitost kolektora. Prema [11] potrebno je osigurati minimalnu vodljivost spoja od 30 W/(m²K). Iz slike se vidi kako pri niskim vrijednostima vodljivosti spoja (manje od 30 W/(m²K)) učinkovitost kolektora se intenzivnije smanjuje. Pri vrijednostima vodljivosti većim od 100 W/(m²K) učinkovitost kolektora se ne mijenja značajnije. To se može objasniti time da je otpor prijelazu topline s cijevi na vodu veći od otpora prolaza topline kroz apsorber i cijevi. Na Slici 16 je prikazan

utjecaj udaljenosti stakla i ploče apsorbera na efikasnost kolektora. Vidljivo je kako se učinkovitost kolektora može povećati ili povećanjem udaljenosti stakla od apsorbera ili smanjivanjem udaljenosti na vrijednost manju od 15 mm.



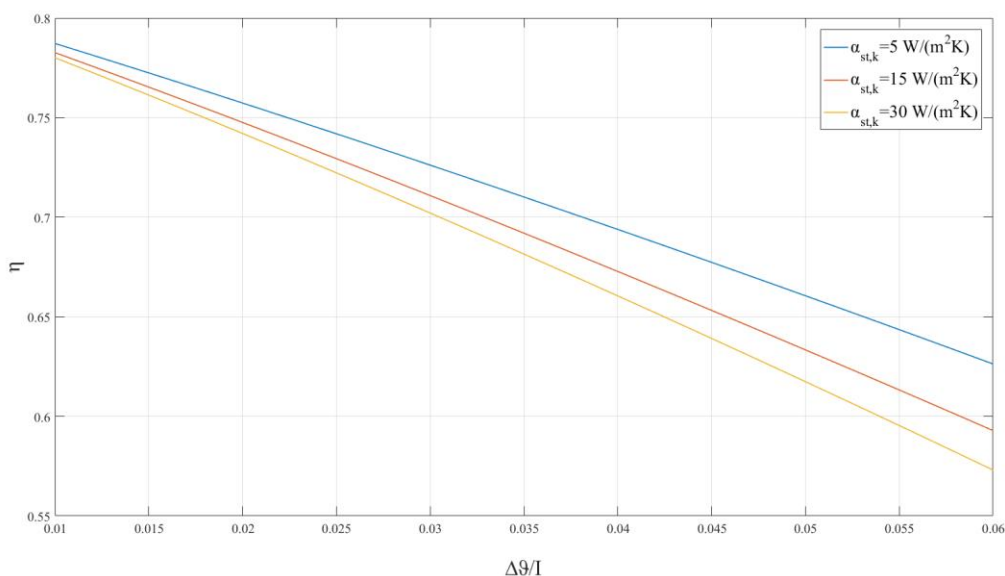
Slika 15 Utjecaj vodljivosti spoja na učinkovitost kolektora



Slika 16 Utjecaj udaljenosti stakla i ploče apsorbera na učinkovitost kolektora

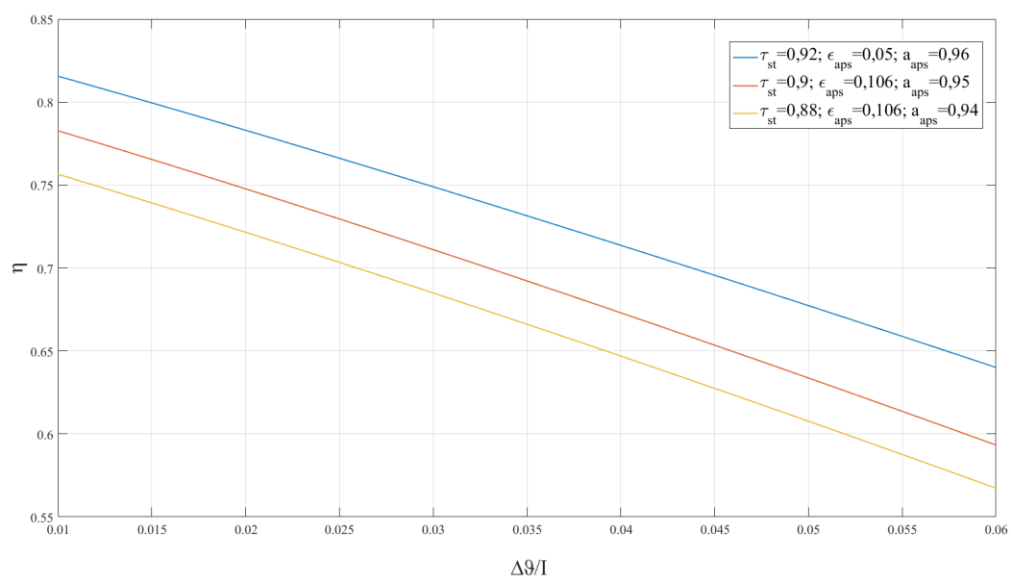
Na Slici 17 je prikazan utjecaj koeficijenta prijelaza topline sa stakla na zrak iznad vrha kolektora. Kod malih vrijednosti $\Delta\theta/I$ utjecaj konvektivnog prijelaza zbog vjetra je mali, dok s povećanjem vrijednosti $\Delta\theta/I$ smanjenje učinkovitosti kolektora postaje izraženije s porastom

koeficijenta prijelaza topline. Minimalan vrijednost koeficijenta prijelaza topline iznosi $5 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ što odgovara uvjetima slobodne konvekcije [11]. Vrijednost od $15 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ odgovara brzini vjetra od 4 m/s , a vrijednost od $30 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ odgovara brzini vjetra od 9 m/s .



Slika 17 Utjecaj koeficijenta prijelaza topline sa stakla na okolišni zrak na učinkovitost kolektora

Na Slici 18 je prikazan utjecaj optičkih svojstava pokrovnog stakla i ploče apsorbera odnosno njegovog premaza. Srednja krivulja je određena za optička svojstva korištena u analitičkom i numeričkom modelu. Ostale dvije krivulje predstavljaju moguću varijaciju učinkovitosti kolektora zbog pogreške prilikom mjerenja optičkih svojstava. Plava krivulja predstavlja najbolji mogući scenarij, u kojem su koeficijent apsorpcije i propusnosti najveći mogući, a koeficijent emisije premaza apsorbera je najmanji. Žuta krivulja predstavlja najgori mogući scenarij, u kojem su koeficijent apsorpcije i propusnosti najmanji mogući, a koeficijent emisije premaza apsorbera je najveći.



Slika 18 Utjecaj optičkih svojstava na učinkovitost kolektora

5. NUMERIČKI MODEL SOLARNOG KOLEKTORA

U prethodnom je poglavlju definiran matematički model pločastog solarnog kolektora kojim je opisan mehanizam izmjene topline unutar pločastog kolektora, koji uključuje slobodnu konvekciju između ploče apsorbera i pokrovnog stakla, zračenje ploče apsorbera prema staklu, prisilnu konvekciju u prostoru iznad pokrovnog stakla i zračenje stakla prema nebu. Na temelju tog modela, provedena je parametarska analiza kolektora te je ispitan utjecaj konstrukcijskih parametara i optičkih svojstava na učinkovitost kolektora. Nadalje, razvijen je 2D numerički model simulacije izmjene topline unutar pločastog kolektora. Simulacija izmjene topline provedena je uz pomoć programskog paketa FLUENT. U nastavku rada prikazani su modeli korišteni za simulaciju izmjene topline kao i strujanja fluida. Također, prikazana je numerička domena na kojoj se rješavaju diferencijalne jednačbe kao i postavljeni rubni uvjeti.

5.1. IZMJENA TOPLINE SLOBODNOM KONVEKCIJOM

Mehanizam izmjene topline slobodnom konvekcijom javlja se u zatvorenom prostoru između ploče apsorbera i pokrovnog stakla. Slobodna konvekcija se javlja kada je temperatura tijela različita od temperature fluida. Nastala razlika temperature uzrokuje razlike u gustoći fluida uz površinu tijela i fluida koji se nalazi podalje od površine tijela. Zbog toga nastaju pozitivne ili negativne uzgonske sile u fluidu uz površine. Predznak uzgonske sile ovisi o tome da li je površina tijela toplija ili hladnija od okolišnog fluida. Posljedica je gibanje fluida u vertikalnom smjeru što uzrokuje konvektivni prijelaz topline.

Rješavanje problema slobodne konvekcije u zatvorenom prostoru između ploče apsorbera i pokrovnog stakla temelji se na rješavanju jednačbi kontinuiteta (5.1), količine gibanja (5.2) i energetske jednačbe (5.3) koje su izvedene uz Boussinesq-ovu pretpostavku o ovisnosti gustoće fluida o temperaturi samo u uzgonskom članu. Model je ograničena na laminarno strujanje i na dovoljno male temperaturne razlike. Jednačbe su prikazane u nastavku

$$\frac{\partial(\rho u_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (5.1)$$

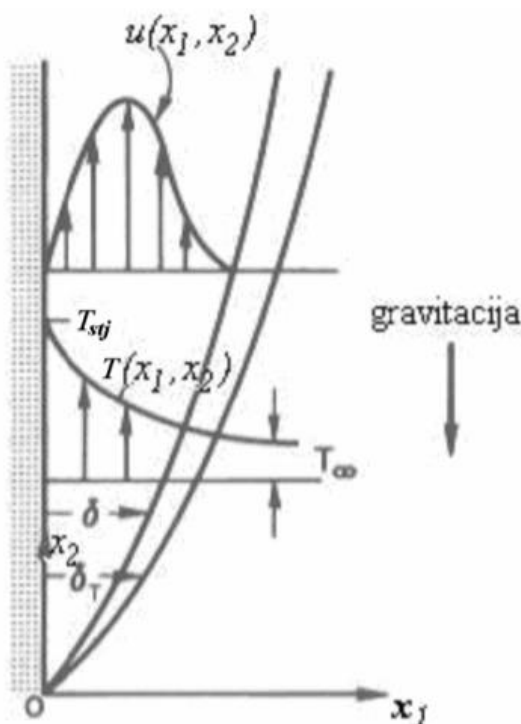
$$\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu_v - \frac{2}{3} \mu \right) \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ji} \right] + \rho f_i \quad (5.2)$$

$$\frac{\partial(\rho c u_j T)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) \quad (5.3)$$

gdje je f_i specifična masena sila, μ koeficijent dinamičke viskoznosti, μ_v koeficijent volumenske viskoznosti. Za većinu slučajeva u kojima se pojavljuje slobodna konvekcija, korištenjem Boussinesq-ovog model moguće je ostvariti bržu konvergenciju nego korištenjem modela u kojem je gustoća fluida postavljena kao funkcija temperature [12]. To je zato što je u Boussinesq-ovom modelu zanemarena promjena gustoće, osim u članu koji predstavlja uzgonske sile uzrokovane promjenama gustoće. Boussinesq-ova aproksimacija gustoće se definira kao (5.4)

$$\rho \cong \rho_\infty [1 - \beta'(T - T_\infty)] \quad (5.4)$$

gdje je β' volumetrički koeficijent ekspanzije. Potrebno je naglasiti kako ova aproksimacija vrijedi sve dok je razlika temperature fluida i površine stjenke dovoljno mala, odnosno kad je $\beta'(T - T_\infty) \ll 1$. Ovaj uvjet je bio zadovoljen u svim provedenim simulacijama. Na Slici 19 je prikazan profil brzine i temperature u laminarnom strujanju uz vertikalnu stjenku.



Slika 19 Profil brzine i temperature u laminarnom strujanju uz stjenku [9]

U jednadžbi (5.2) tlak p se može prikazati kao zbroj hidrostatskog tlaka p_∞ i p' . Hidrostatski tlak prevladava izvan područja graničnog sloja gdje su vrijednosti temperature i gustoće konstante. Hidrostatski tlak se mijenja prema $p_\infty = -\rho_\infty g x_2$. Tlak p' predstavlja razliku između stvarnog i hidrostatskog tlaka. Tlak p se potom može zapisati kao

$$p = -p_\infty g x_2 + p' \quad (5.5)$$

Deriviranjem izraza (5.5) u smjeru x_1 i x_2 dobijemo izraze

$$\frac{\partial p}{\partial x_1} = \frac{\partial p'}{\partial x_1} \quad (5.6)$$

$$\frac{\partial p}{\partial x_2} = -p_\infty g + \frac{\partial p'}{\partial x_2} \quad (5.7)$$

Uvrštavanjem jednadžbi (5.6) i (5.7) u jednadžbu količine gibanja u smjeru osi x_1 i x_2 dobijemo

$$\rho_\infty \left(u_1 \frac{\partial u_1}{\partial x_1} + u_2 \frac{\partial u_1}{\partial x_2} \right) = -\frac{\partial p'}{\partial x_1} + \mu \left(\frac{\partial^2 u_1}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 u_1}{\partial x_2^2} \right) \quad (5.8)$$

$$\rho_\infty \left(u_1 \frac{\partial u_2}{\partial x_1} + u_2 \frac{\partial u_2}{\partial x_2} \right) = -\frac{\partial p'}{\partial x_2} + \mu \left(\frac{\partial^2 u_2}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 u_2}{\partial x_2^2} \right) + g(\rho_\infty - \rho) \quad (5.9)$$

Kako je napomenuto prije, korištenjem Bousinessq-ovog modela, ovisnost gustoće fluida o temperaturi zanemarena je u svim članovima u jednadžbama (5.8) i (5.9) osim u uzgonskom članu (zadnji član u jednadžbi (5.9)). Uvrštavanjem izraza (5.4) u izraz (5.9) dobiva se konačni oblik jednadžbe količine gibanja u smjeru osi x_2

$$\rho_\infty \left(u_1 \frac{\partial u_2}{\partial x_1} + u_2 \frac{\partial u_2}{\partial x_2} \right) = -\frac{\partial p'}{\partial x_2} + \mu \left(\frac{\partial^2 u_2}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 u_2}{\partial x_2^2} \right) + g\rho_\infty \beta' (T - T_\infty) \quad (5.10)$$

Iz jednadžbe (5.10) se također uočava kako su polja brzine i temperature međusobno ovisni.

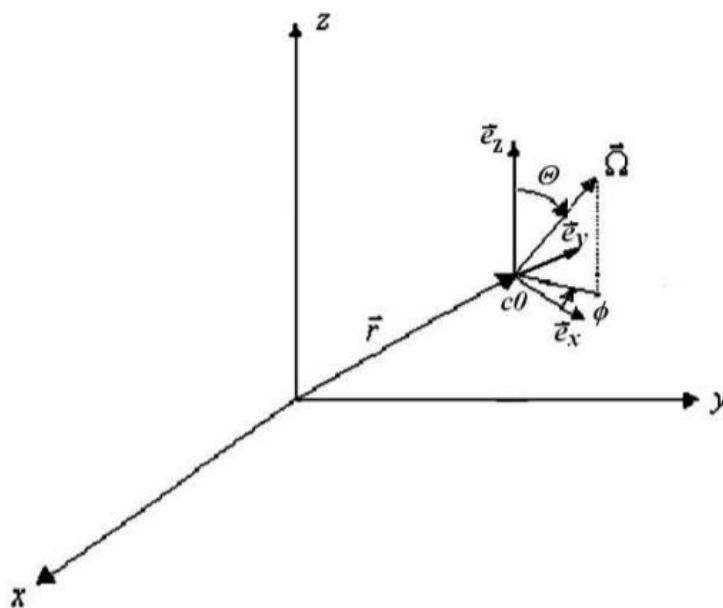
5.2. IZMJENA TOPLINE ZRAČENJEM

Izmjena topline zračenjem javlja se između ploče apsorbera i površine stakla. Ova izmjena topline modelirana je pomoću numeričkog modela DO („Discrete Ordinates“). DO model se temelji na rješavanju transportne jednadžbe (5.5) za konačan broj diskretnih kontrolnih kutova

$$\begin{aligned} d\Omega \frac{dI(\vec{r}, \vec{\Omega})}{d\Omega} \Big|_{\vec{\Omega}} &= -(a + \sigma_s) I(\vec{r}, \vec{\Omega}) + an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} \\ &+ \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_{\vec{\Omega}=4\pi} I(\vec{r}, \vec{\Omega}') \phi(\vec{r}, \vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega}) d\Omega' \end{aligned} \quad (5.11)$$

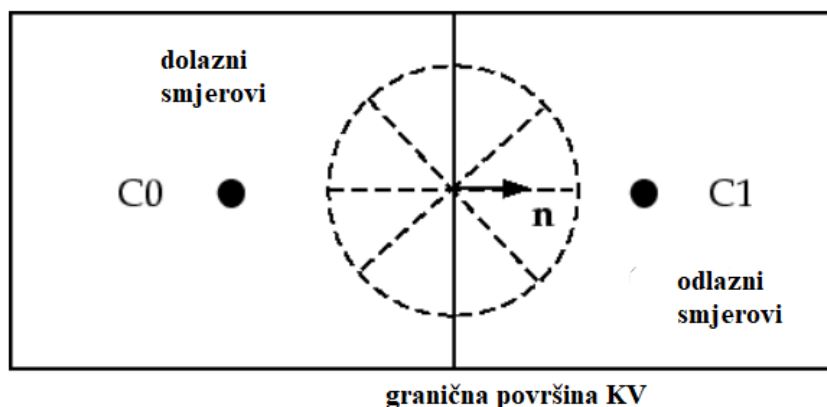
gdje je $I(\vec{r}, \vec{\Omega})$ intenzitet zračenja, $\vec{\Omega}$ je vektor smjera širenja zračenja, \vec{r} je vektor položaja pojedine točke u koordinatnom sustavu, T je temperatura medija, σ je Steffan-Boltzmann-ova konstanta, n je indeks loma medija, dok je $\phi(\vec{r}, \vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega})$ funkcija raspršenog zračenja koje dolazi iz smjera vektora $\vec{\Omega}'$ te odlazi u smjeru vektora $\vec{\Omega}$.

Kod rješavanja transportne jednadžbe zračenja, važna je diskretizacija kutnog prostora oko točke $c0$. Točka $c0$ u prostoru prikazana je na Slici 20. Svaki oktant 4π kutnog prostora je diskretiziran u $N_\theta \times N_\phi$ kontrolnih kutova. Kut Θ predstavlja polarni kut, dok kut ϕ predstavlja azimut. Gustoća podjele kutnog prostora je uzeta $N_\theta = N_\phi = 2$ za model s grijačem. dok kod *semi transparent* model ta podjela iznosi $N_\theta = 2$, $N_\phi = 10$. U 2D prostoru se zbog simetrije, diskretizirana jednadžba zračenja rješava u 4 oktanta što čini ukupno $4 N_\theta \times N_\phi$ smjerova oko točke $c0$.

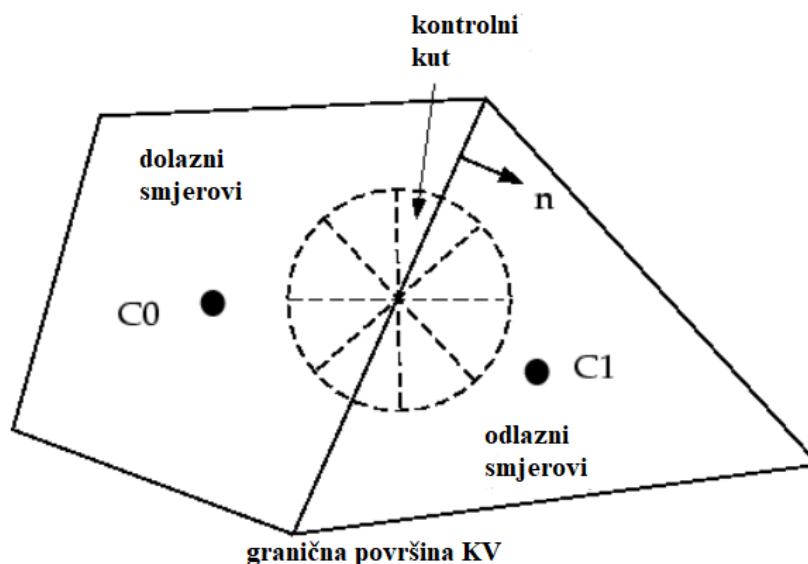


Slika 20 Prikaz prostorne točke $c0$ [9]

Položaj kontrolnih kutova kod strukturirane i nestrukturirane mreže prikazan je na Slici 21 i Slici 22. Kod primjene nestrukturirane mreže, granica kontrolnih kutova se ne poklapa s granicom kontrolnog volumena zbog čega jedan kontrolni kut može pripadati dolaznim i odlaznim smjerovima u isto vrijeme, tzv. „*overhanging control angle*“. Ovaj problem se rješava pikselizacijom takvog kontrolnog kuta.



Slika 21 Položaj kontrolnih kutova - strukturirana mreža [13]



Slika 22 Položaj kontrolnih kutova - nestrukturirana mreža [13]

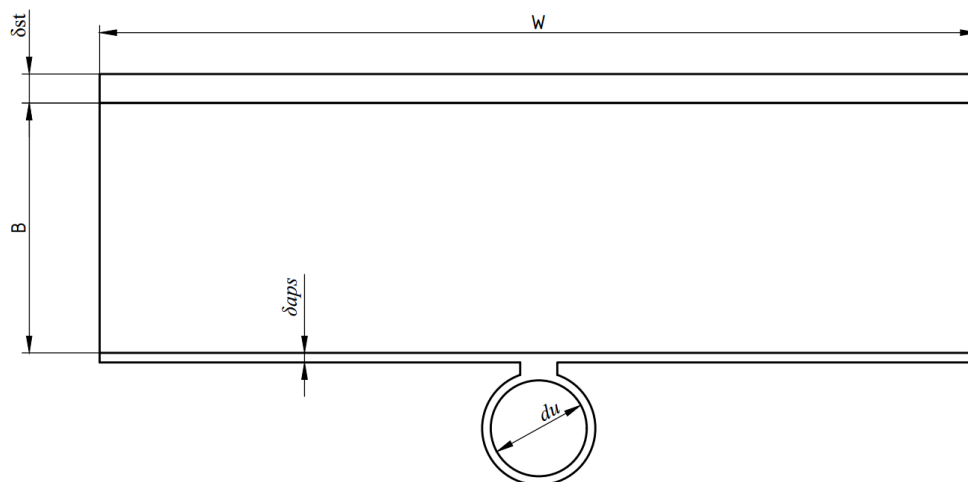
Jednadžba zračenja se rješava nakon što je određeno temperaturno polje iz osnovnog seta jednadžbi dinamike fluida koje su pokazane u prethodnom poglavlju. Nakon određivanja temperaturnog polja koje zadovoljava jednadžbu zračenja, s tako dobivenim temperaturnim poljem se ponovno rješavaju osnovne jednadžbe dinamike fluida sve dok se ne odredi temperaturno polje koje zadovoljava jednadžbu zračenja i osnovni set jednadžbi dinamike fluida.

5.3. DISKRETIZACIJA PODRUČJA PRORAČUNA I RUBNI UVJETI

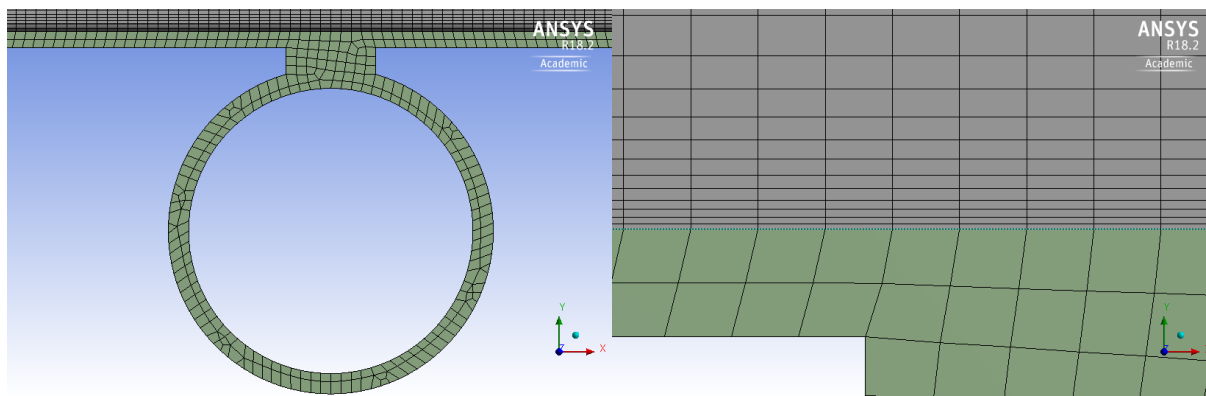
U ovom dijelu je prikazana diskretizacija prostora proračuna za promatrane modele kolektora. Promatrana su dva tipa kolektora, klasični pločasti kolektor i polimerni solarni kolektor. U oba dva slučaja se radi o 2D simulacijama.

5.3.1. Pločasti solarni kolektor

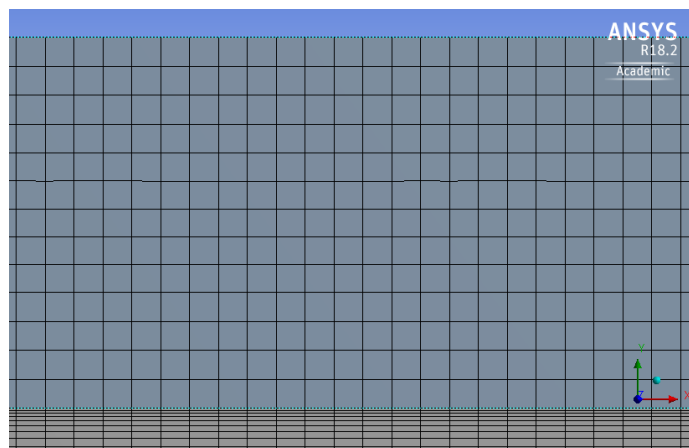
Osnovni konstrukcijski parametri promatranog pločastog kolektora prikazani su u Tablica 1 u poglavlju 4. Geometrijska mreža za proračun jednadžbi opisanih u prethodnom dijelu izrađena je uz pomoć programa koji se nalazi u sklopu ANSYS-ovog paketa. Na Slici 23 je prikazana geometrija pločastog kolektora. Na Slici 24 i Slici 25 prikazane se geometrijske mreže ploče apsorbera i stakla, kao i prostora između njih u kojem se nalazi zrak.



Slika 23 Geometrija pločastog kolektora



Slika 24 Geometrijska mreža apsorbera i graničnog sloja iznad apsorbera



Slika 25 Geometrijska mreža stakla i graničnog sloja uz staklo

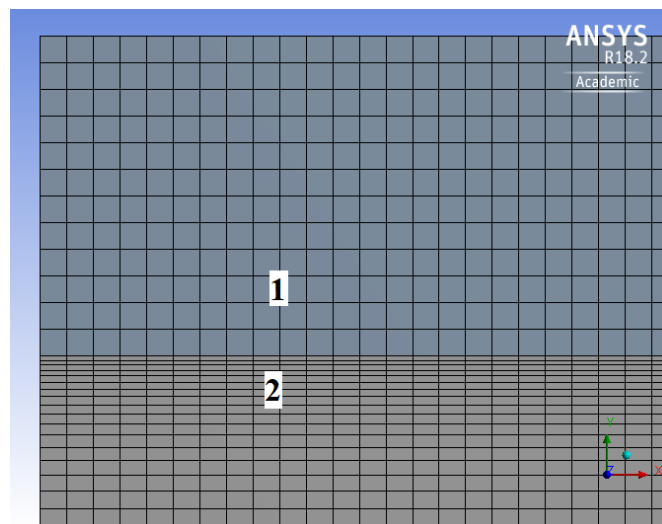
Osnovne informacije o numeričkoj domeni dani su u Tablici 7. Koeficijent asimetrije (*skewness*) i ortogonalnost su mjere kvalitete mreže. Za dobru kvalitetu mreže vrijednost koeficijenta asimetrije treba težiti 0, dok ortogonalnost treba težiti 1.

Tablica 7 Osnovne informacije o geometrijskoj mreži pločastog kolektora

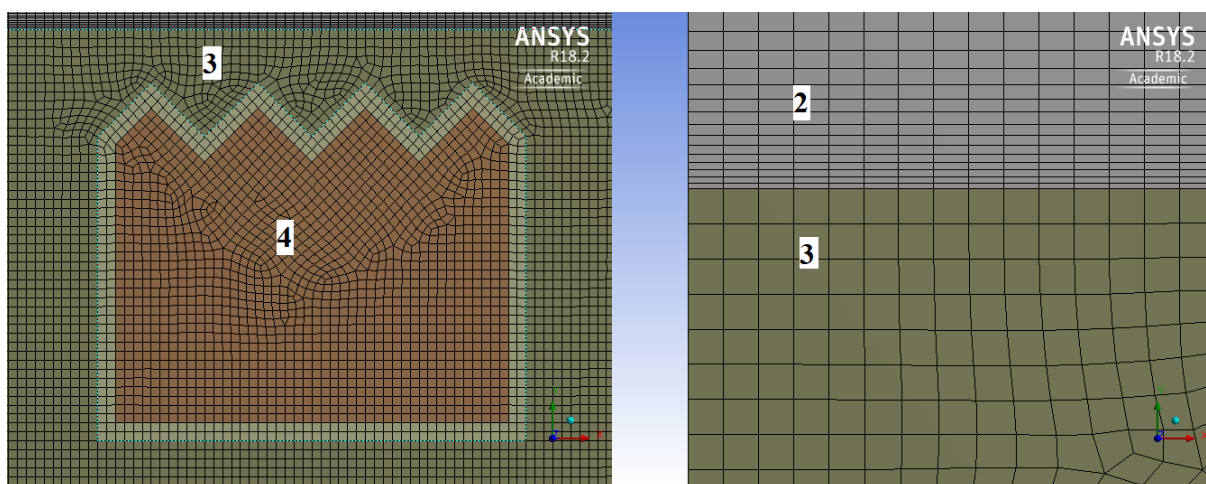
Maksimalna veličina elemenata, m	2,5e-4
Minimalna veličina elemenata, m	2,5e-6
Maksimalna ortogonalnost	1
Prosječna ortogonalnost	0,9973
Minimalna ortogonalnost	0,7859
Maksimalni <i>skewness</i>	0,4803
Prosječni <i>skewness</i>	1,32e-2
Minimalni <i>skewness</i>	1,31e-10
Broj elemenata	47.723

5.3.2. Polimerni solarni kolektor

Promatrana su dva tipa polimernog solarnog kolektora. Konstrukcijski parametar koji se mijenjao u modelima kolektora je hidraulički promjer kanala. Mreža prvog modela prikazan je na Slici 26 i Slici 27.



Slika 26 Geometrijska mreža pokrova i graničnog sloja (prvi model)



Slika 27 Geometrijska mreža jednog kanala i graničnog sloja iznad (prvi model)

Dijelovi mreže prikazane na slikama iznad su:

- 1 – Pokrov
- 2 – Zrak
- 3 – Apsorber
- 4 – Kanal

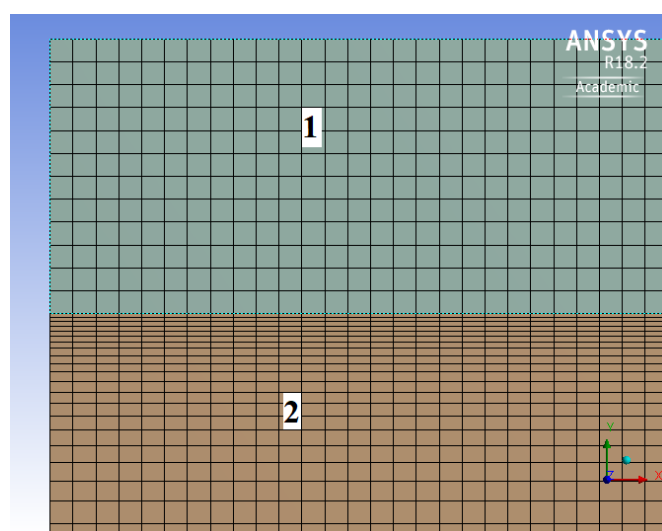
Informacije o kvaliteti mreže prvog modela polimernog kolektora dane su u Tablici 8.

Tablica 8 Osnovne informacije o mreži prvog modela polimernog solarnog kolektora

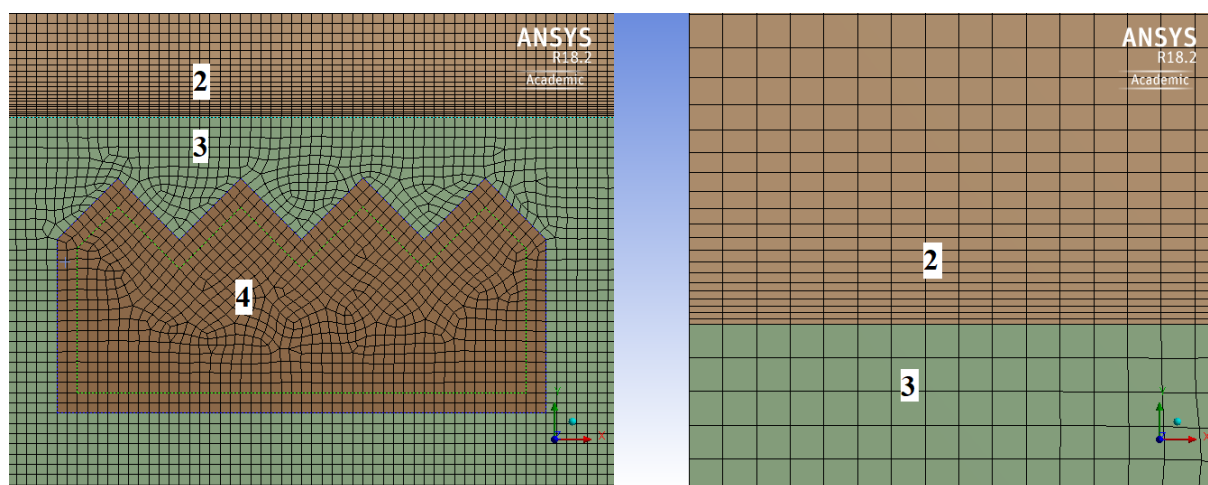
Maksimalna veličina elemenata, m	2,5e-4
Minimalna veličina elemenata, m	2e-6
Maksimalna ortogonalnost	1

Prosječna ortogonalnost	0,9969
Minimalna ortogonalnost	0,7025
Maksimalni <i>skewness</i>	0,6405
Prosječni <i>skewness</i>	2,14e-2
Minimalni <i>skewness</i>	1,31e-10
Broj elemenata	37.586

Nadalje, geometrijska mreža drugog modela polimernog solarnog kolektora prikazana je na Slici 28 i Slici 29. Kod ovog modela, visina kanala je smanjena za 50% čime se ostvaruje veći konvektivni prijelaz topline. Dijelovi mreže drugog modela označeni brojevima 1 – 4, isti su kao i kod mreže prvog modela. Kao i kod prvog modela, informacije o kvaliteti mreže drugog modela kolektora prikazane su u Tablici 9.



Slika 28 Geometrijska mreža pokrova i graničnog sloja (drugi model)



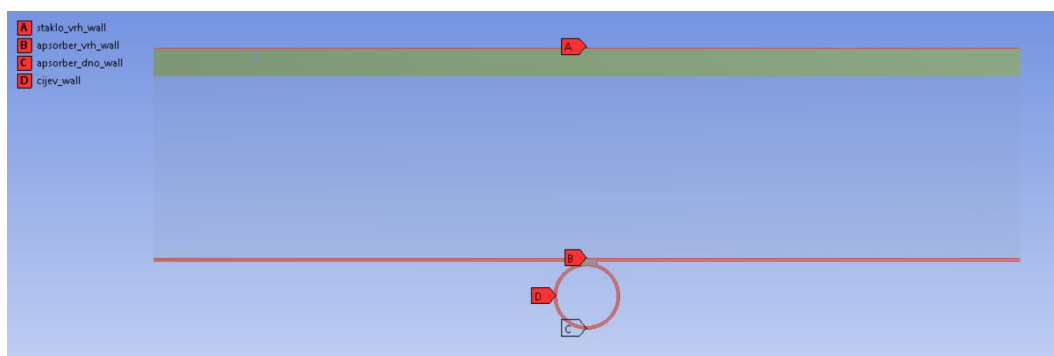
Slika 29 Geometrijska mreža jednog kanala i graničnog sloja iznad (drugi model)

Tablica 9 Osnovne informacije o mreži drugog modela polimernog solarnog kolektora

Maksimalna veličina elemenata, m	2,5e-4
Minimalna veličina elemenata, m	2e-6
Maksimalna ortogonalnost	1
Prosječna ortogonalnost	0,9969
Minimalna ortogonalnost	0,7013
Maksimalni <i>skewness</i>	0,5760
Prosječni <i>skewness</i>	1,92e-2
Minimalni <i>skewness</i>	1,31e-10
Broj elemenata	33.453

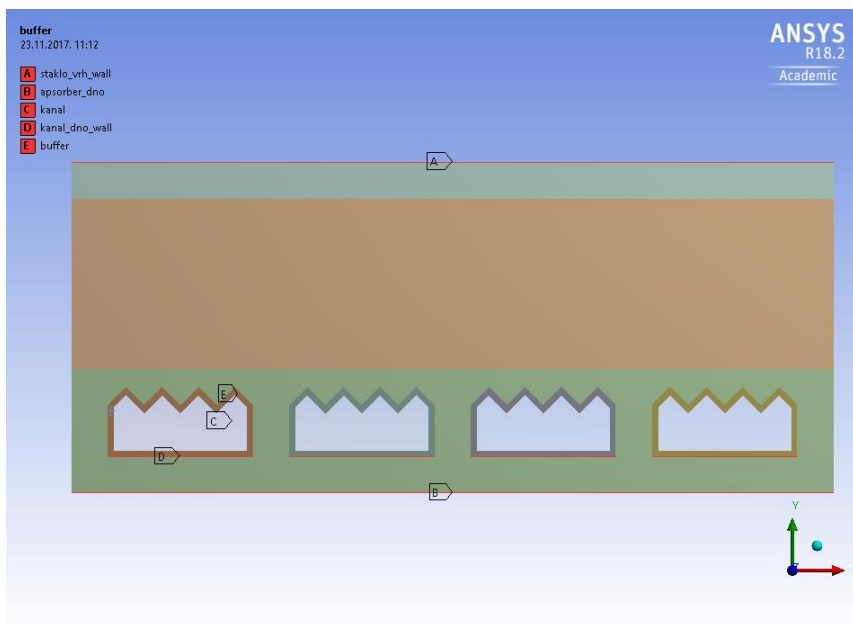
5.3.3. Rubni uvjeti

Na Slici 30 su prikazani bridovi na kojima je potrebno postaviti rubne uvjete kod pločastog solarnog kolektora. Na bridu `apsorber_dno_wall` postavljen je adijabatski rubni uvjet. Na bridu `staklo_vrh_wall` postavljen je rubni uvjet koji obuhvaća zračenje prema nebu kao i konvektivni prijelaz topline na zrak iznad pokrovnog stakla. Na bridu `cijev_wall` postavljen je rubni uvjet konvektivnog prijelaza topline. Na kraju, na bridu `apsorber_vrh_wall` postavljen je toplinski izvor koji predstavlja apsorbirano sunčevo zračenje snage $G = I \tau_{st} a_{aps}$. Parametri za konvektivni prijelaz topline sa stakla na zrak, s cijevi na vodu kao i svojstva zraka uzeta su prema vrijednostima dobivenim analitičkim proračunom pri čemu treba voditi računa radi li se od ljetnom ili zimskom režimu rada. Kod *semi transparent* modela, umjesto izvora u bridu `apsorber_vrh_wall`, direktno se postavlja vrijednost sunčevog zračenja na brid `staklo_vrh_wall`. Kod *semi transparent* modela, posebnu pažnju treba posvetiti optičkim svojstvima stakla i zraka kao i diskretizaciji kutnog prostora.



Slika 30 Postavljanje rubnih uvjeta za pločasti kolektor

Dalje, na Slici 31 prikazani su bridovi na kojima je potrebno postaviti rubne uvjete kod drugog modela polimernog kolektora. Rubni uvjeti za prvi model kolektora su isti kao i kod drugog modela kolektora. Ovdje također treba voditi računa radi li se o ljetnom ili zimskom režimu rada.



Slika 31 Postavljanje rubnih uvjeta za polimerni kolektor

Na bridu apsorber_dno postavljen je konvektivni rubni uvjet s obzirom na to da ovakav tip kolektora nije izoliran s donje strane. Na bridu staklo_vrh_wall postavljen je rubni uvjet koji obuhvaća zračenje prema nebu kao i konvektivni prijelaz topline na zrak iznad pokrova. Toplinski izvor je postavljen na bridu kanal_dno_wall. U zoni kanal postavljena je konstantna temperatura vode. Kako je na bridu kanal_dno_wall postavljen toplinski izvor nije bilo moguće postaviti konvektivni rubni uvjet te se taj problem riješio postavljanjem buffer sloja koji ima ista svojstva kao i voda u kanalu, osim toplinske provodnosti, koja je postavljena tako da odgovara koeficijentu konvektivnog prijelaza topline za tu temperaturu vode (jednadžba (5.12)). Debljina buffer sloja je 0,5 mm.

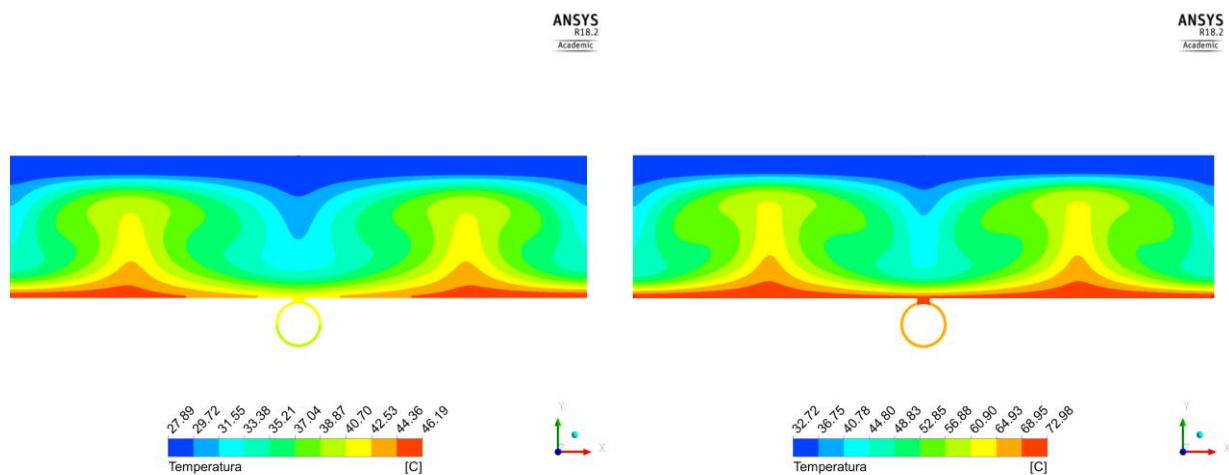
$$\lambda_B = \alpha_B \cdot \delta_B \quad (5.12)$$

6. REZULTATI NUMERIČKIH SIMULACIJA

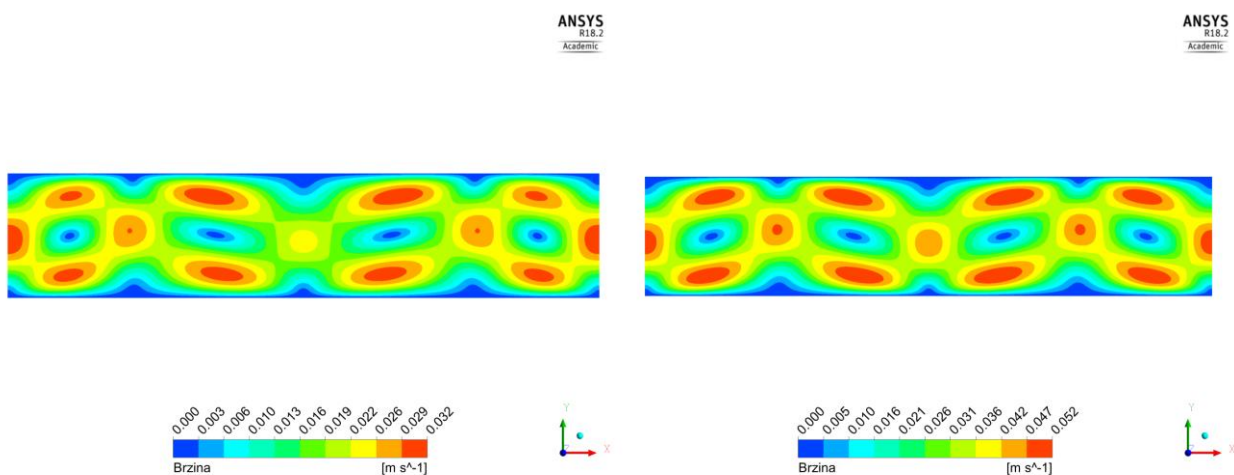
U nastavku su prikazani rezultati dobiveni pomoću numeričkih simulacija za klasični kolektor i polimerni kolektor. Dobiveni rezultati su uspoređeni s rezultatima dobivenim pomoću analitičkog proračuna i mjerenja. Također su prikazana temperaturna polja i polja brzine za pojedine radne točke u ljetnom i zimskom režimu rada.

6.1. PLOČASTI SOLARNI KOLEKTOR

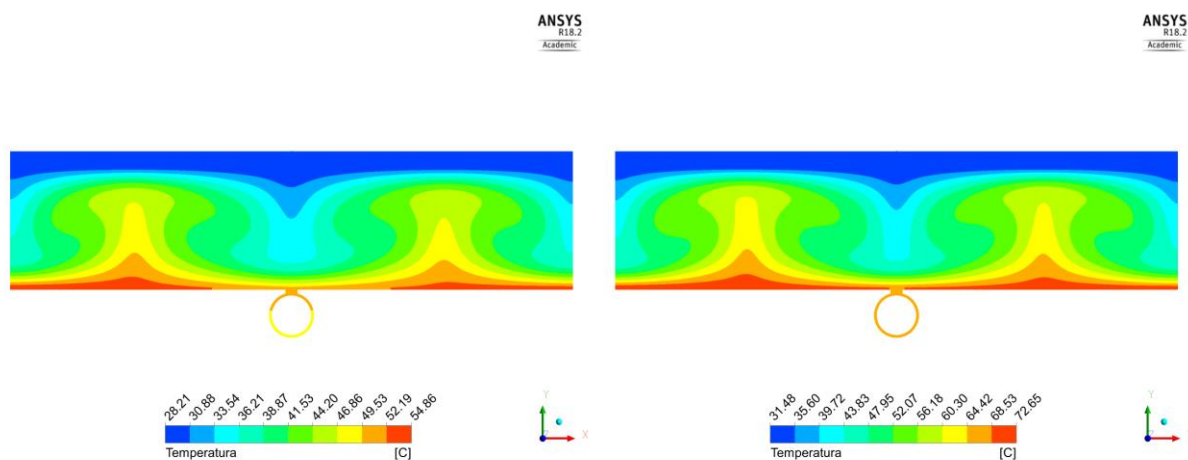
Na Slici 32 je prikazano temperaturno polje za dvije radne točke, RT1 i RT4 u ljetnom režimu rada kod modela s grijačem, dok je na Slici 33 prikazano polje brzine za iste radne točke. Iz slika se uočava simetrična raspodjela temperaturnog polja i polja brzine u odnosu na cijev. Iz polja brzine se vidi kako je slobodna konvekcija dobro razvijena i u RT1. Intenzitet konvekcije raste kako raste temperatura fluida koji struji unutar cijevi što dovodi do širenja utjecaja recirkulacijskih zona. Na Slici 34 je prikazano temperaturno polje za RT2 i RT4 u ljetnom režimu rada kod *semi transparent* modela, dok je na Slici 35 prikazano polje brzine za iste radne točke. Kod ovog modela se također uočava simetrična raspodjela temperaturnog polja i polja brzine u odnosu na cijev. Također, se vidi formiranje vrtloga kod slobodne konvekcije čiji intenzitet raste kako raste i temperatura fluida unutar cijevi. Međutim, kod *semi transparent* modela uočeni su problemi kod očitavanja toplinskih tokova. Ustanovljeno je da se s pojedinih dijelova previše topline gubi zračenjem, što je posljedica nedovoljnog poznavanja principa rada *semi transparent* rubnih uvjeta te je iz tog razloga za analizu toplinskih karakteristika odabran model s grijačem. Za zimski režim rada su dobiveni isti profili temperatura i brzina, ali drugačijeg intenziteta. Učinkovitost kolektora se odredila očitavanjem toplinskog toka koji prelazi na vodu i njegovim dijeljenjem s upadnim sunčevim zračenjem na proračunski segment.



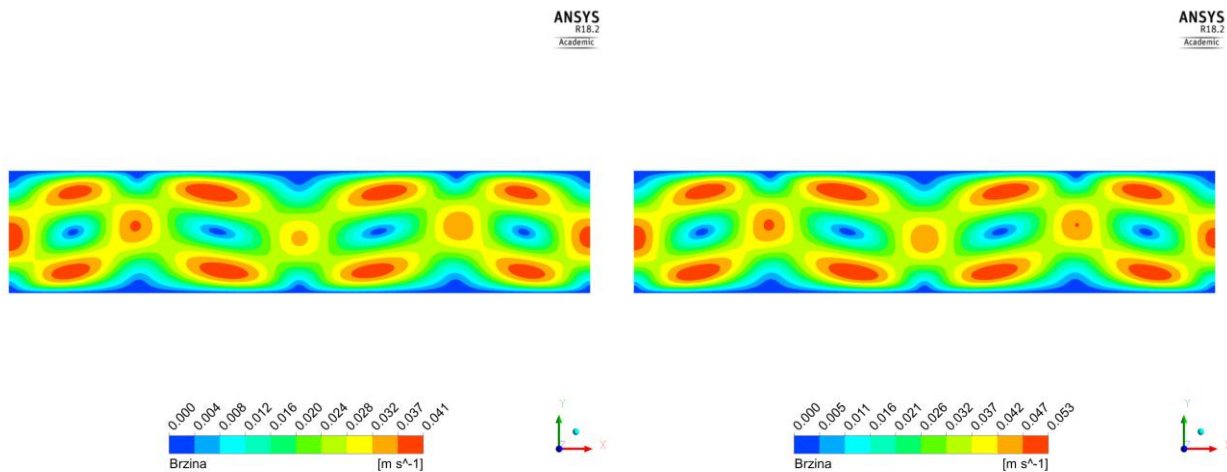
Slika 32 Temperaturno polje klasičnog solarnog kolektora kod modela s grijačem za RT1 (slika lijevo) i RT4 (slika desno)



Slika 33 Polje brzine klasičnog solarnog kolektora kod modela s grijačem za RT1 (slika lijevo) i RT4 (slika desno)



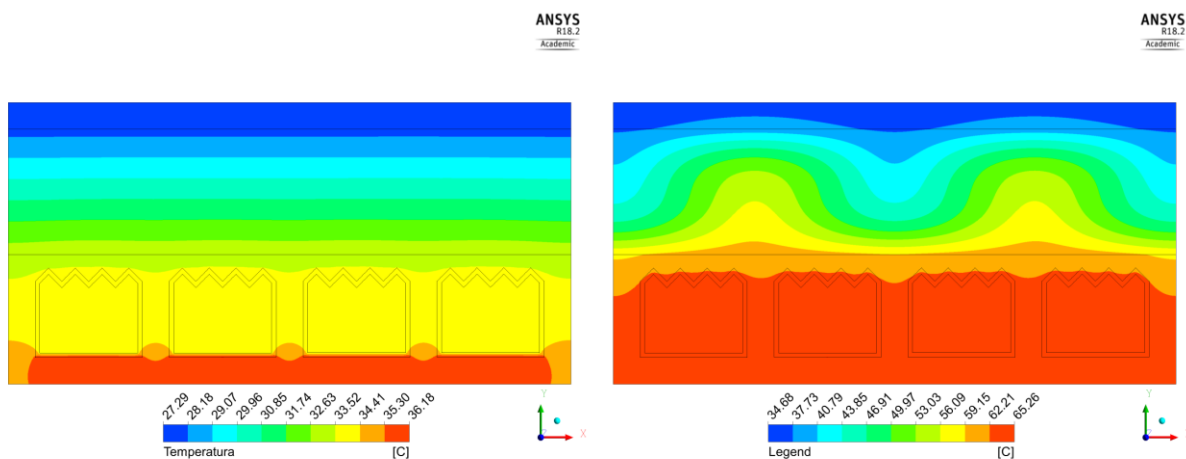
Slika 34 Temperaturno polje klasičnog solarnog kolektora kod *semi transparent* modela za RT2 (slika lijevo) i RT4 (slika desno)



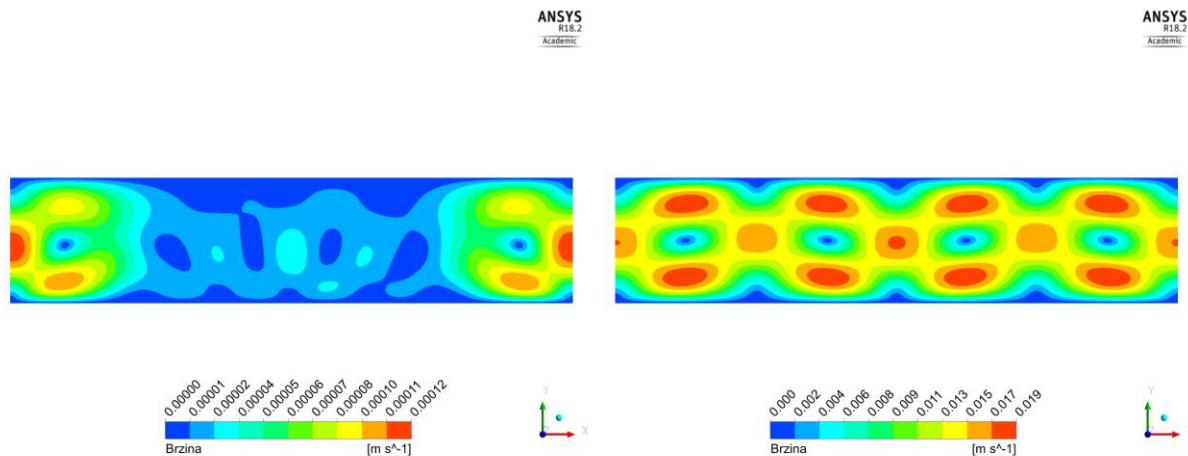
Slika 35 Polje brzine klasičnog solarnog kolektora kod semi transparent modela za RT2 (slika lijevo) i RT4 (slika desno)

6.2. POLIMERNI SOLARNI KOLEKTOR

Na Slici 36 prikazano je temperaturno polje kod polimernog solarnog kolektora, dok je na Slici 37 prikazano polje brzine. Promatrale su se radne točke 1 i 4 gdje su svi uvjeti isti osim koeficijenta prijelaza topline unutar kanala zbog promjene poprečnog presjeka strujanja. Iz slika se uočava simetrična raspodjela temperatura i brzina u kolektoru. Kod ovog tipa kolektora se uočava slabije razvijanje slobodne konvekcije nego kod klasičnog pločastog kolektora u RT1. Kako raste temperatura fluida koji struji unutar kanala raste i intenzitet slobodne konvekcije i dolazi do rasta broja recirkulacijskih zona.

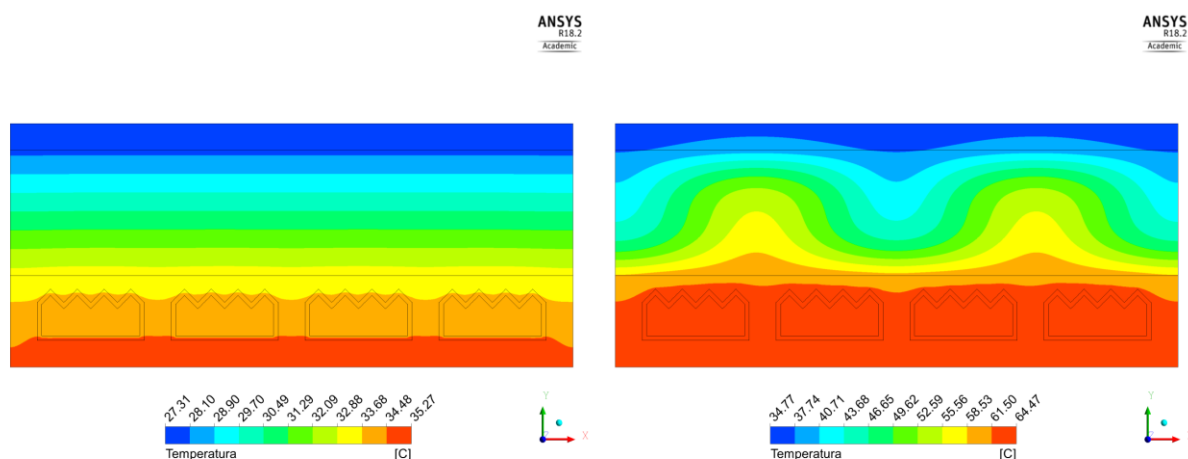


Slika 36 Temperaturno polje polimernog solarnog kolektora (prvi model) za RT1 (slika lijevo) i RT4 (slika desno)

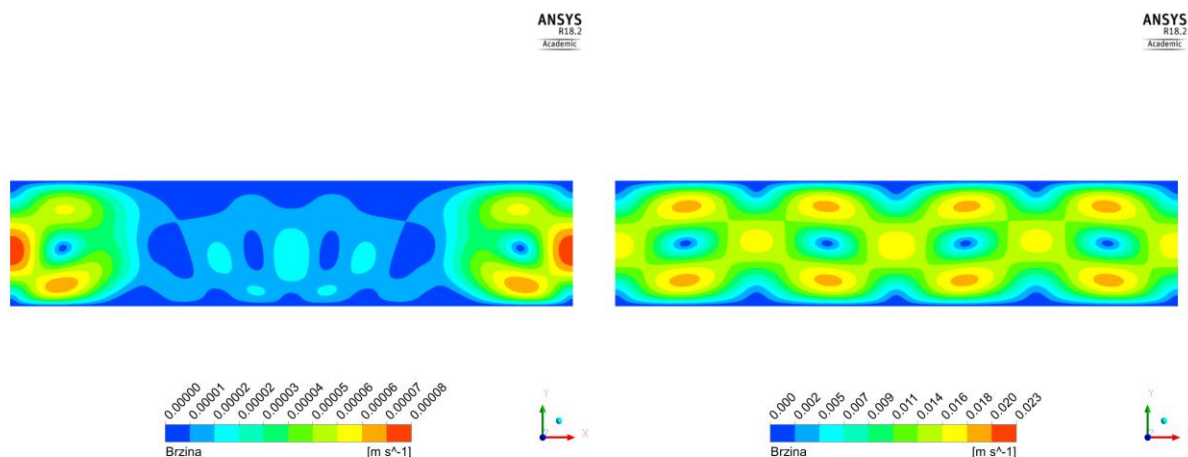


Slika 37 Polje brzine polimernog solarnog kolektora (prvi model) za RT1 (slika lijevo) i RT4 (slika desno)

Na Slici 38 je prikazano dobiveno temperaturno polje kod drugog tipa polimernog kolektora u kojem je visina kanala smanjena za 50%. Na Slici 39 je prikazano polje brzine za isti kolektor. Kao i kod prvog tipa kolektora uočava se simetrična raspodjela profila temperature i brzine. Također se uočava kako intenzitet slobodne konvekcije raste s porastom temperature unutar kanala. Vrijednosti brzina i temperatura su slične onima dobivenim u prvom modelu. Također se vidi kako su maksimalne temperature koje se pojavljuju u polimernom kolektoru za 8°C niže nego temperature koje se javljaju kod klasičnog pločastog kolektora.



Slika 38 Temperaturno polje polimernog solarnog kolektora (drugi model) za RT1 (slika lijevo) i RT4 (slika desno)

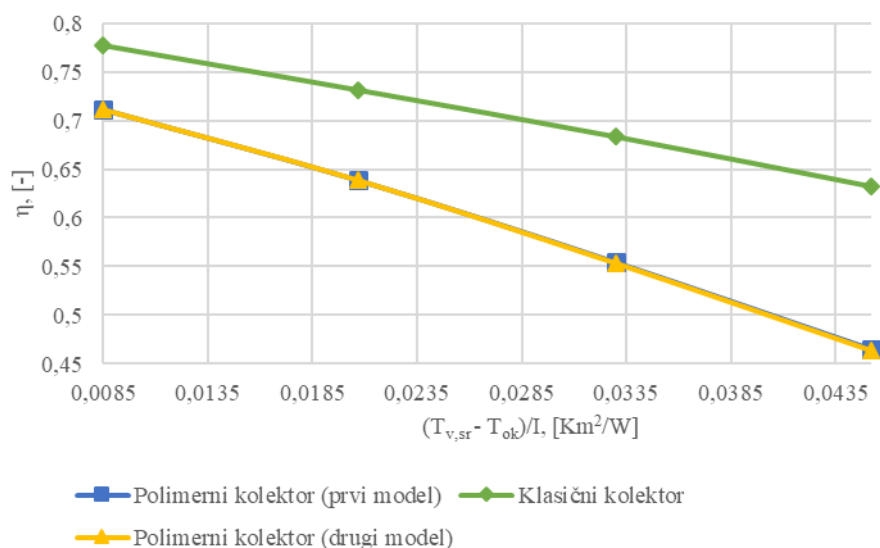


Slika 39 Polje brzine polimernog solarnog kolektora (drugi model) za RT1 (slika lijevo) i RT4 (slika desno)

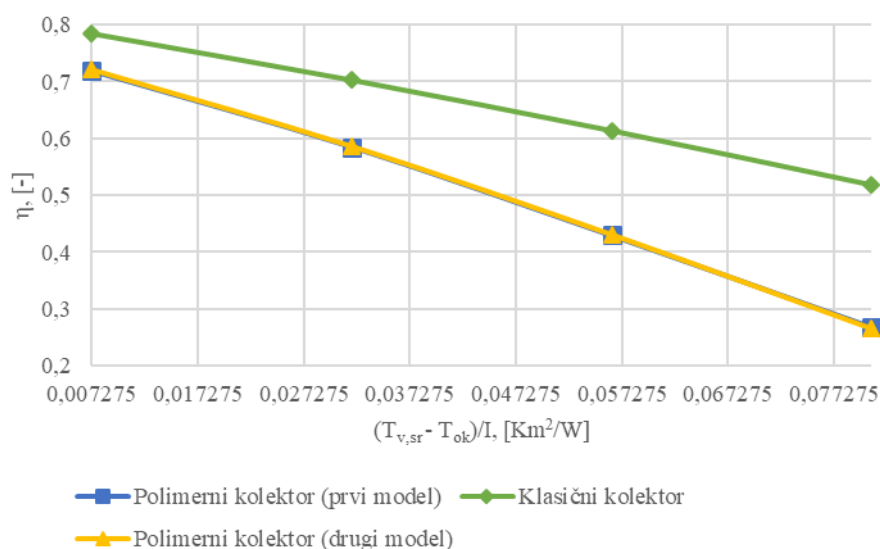
6.2.1. Učinkovitost polimernog solarnog kolektora

Zbog složenije geometrije, učinkovitost polimernog kolektora je određena preko gubitaka s vrha i dna kolektora. Pomoću tih gubitaka i upadnog sunčevog zračenja se odredila količina energije koja je prešla na radni fluid. Na Slici 40 prikazan je dijagram u kojem su pokazane vrijednosti učinkovitosti određene numeričkim simulacijama za ljetni režim rada dok su na Slici 41 prikazane vrijednosti učinkovitosti za zimski režim rada. Uočava se kako je učinkovitost polimernog kolektora u RT1 manja za približno 6% i sve više pada kako raste vrijednost $\Delta g/I$. Razlog velikog odstupanja na početku je taj što polimerni solarni kolektor načelno ima dva pokrova prije plohe na kojoj se vrši apsorpcija sunčevog zračenja, dok klasični kolektor ima jedan pokrov. Uz gore definirana optička svojstva, ($\tau_{st}=0,88$ i $\tau_{pol}=0,9$, $a_{aps}=0,95$) polimerni kolektor u startu gubi 25% zračenja dok, klasični pločasti kolektor gubi 17% upadnog zračenja. Zanimljivo je i uočiti gotovo savršeno poklapanje krivulja za dva modela polimernog kolektora. Smanjenjem visine kanala za 50%, koeficijent konvektivnog prijelaza topline je porastao za približno isto toliko, međutim efikasnost kolektora se nije značajnije promijenila. Također, kod pločastog solarnog kolektora je ustanovljeno da se efikasnost značajnije ne mijenja s porastom koeficijenta prijelaza topline s cijevi na vodu. Isto tako, problem leži u nemogućnosti simuliranja strujanja za 2D slučaj.. Za detaljniji uvid u učinkovitost polimernog kolektora potrebno je provesti 3D simulacije u kojima bi se uzelo u obzir strujanje fluida unutar kanala. Također, zbog složenije geometrije potrebno je koristiti *semi transparent* model umjesto modela s grijačem kako bi se dobili točniji rezultati. U Tablici 10 su prikazane učinkovitosti

sva tri tipa kolektora u zimskom i ljetnom režimu rada. Treba napomenuti kako vrijednost $\Delta\theta/I$ nije ista za ljetni i zimski režim rada.



Slika 40 Učinkovitost kolektora određene numeričkim simulacijama za ljetni režim rada



Slika 41 Učinkovitost kolektora određene numeričkim simulacijama za zimski režim rada

Tablica 10 Učinkovitost sva tri tipa kolektora određene numeričkim simulacijama

Režim rada	Tip kolektora	RT1	RT2	RT3	RT4
Ljeto	Klasični kolektor	77,71	73,13	68,34	63,24
	Polimerni kolektor (prvi model)	71,77	63,84	55,45	46,57
	Polimerni kolektor (drugi model)	71,15	63,89	55,34	46,42
Zima	Klasični kolektor	78,55	70,32	61,39	51,80
	Polimerni kolektor (prvi model)	71,81	58,44	42,92	26,82
	Polimerni kolektor (drugi model)	72,11	58,58	43,04	26,53

ZAKLJUČAK

U ovom radu napravljen je model za određivanje toplinskih karakteristika solarnog toplovodnog kolektora izrađenog od polimera kao dijela postupka optimizacije i izrade prototipa.

U prvom dijelu rada razvijen je analitički model klasičnog pločastog kolektora. Analitički model je uspoređen s rezultatima mjerenja, te se pokazalo poklapanje krivulje učinkovitosti određene analitičkim putem i mjerenjima. Uz određivanjem učinkovitosti klasičnog kolektora provedena je i parametarska analiza u kojoj se ispitaio utjecaj konstrukcijskih i pogonskih parametara. Parametri koji su bili promatrani su, visina međuprostora u kojem se nalazi zrak, koeficijent prijelaza topline s cijevi na vodu i sa stakla na zrak iznad njega, vodljivost spoja kao i utjecaj optičkih svojstava materijala.

Dalje u radu se razvio numerički model za simulaciju izmjene topline unutar klasičnog kolektora. Za simulaciju izmjene topline korištena su dva modela, model s grijačem i *semi transparent* model. U modelu s grijačem, sunčevo zračenje se modeliralo kao toplinski izvor na gornjoj ploči apsorbera. Model s grijačem pokazao je dobro poklapanje s analitičkim i eksperimentalnim rezultatima. Rezultati dobiveni pomoću ovog modela odstupaju od analitičkih i eksperimentalnih rezultata do 2%. U *semi transparent* modelu, direktno se postavlja vrijednost i smjer sunčevog zračenja na ulaznu površinu koja je u ovom slučaju gornja ploha pokrovnog stakla. Kod ovog modela potrebno je i obratiti pažnju na diskretizaciju kutnog prostora kao i svojstva pokrovnog stakla koje utječu na točnost i vrijeme simulacije. *Semi transparent* model je pokazao velika odstupanja (6 – 7%) od eksperimentalnih i analitičkih rezultata. Problem leži u premaloj diskretizaciji kutnog prostora koja uzrokuje gubitke topline, no s povećanjem diskretizacije kutnog prostora vrijeme simulacije se drastično povećava. Također, problem je i u definiranju optičkih svojstva stakla. Zbog ovih problema, za daljnju analizu polimernog kolektora se odabrao model s grijačem.

Na kraju, pomoću numeričkog modela s grijačem, provedena je simulacija rada polimernog solarnog kolektora. Simulacija je provedena za dva različita tipa polimernog kolektora. Modeli su se razlikovali u visini kanala. U drugom model visina kanala je smanjena za 50% čime se poboljšao prijelaz topline na vodu. Rezultati simulacija su pokazali da je učinkovitost polimernog kolektora $\Delta q/I = 0,0085$ manja oko 6% i ta razlika raste kako raste $\Delta q/I$. Rezultati su također pokazali da nema razlike u učinkovitosti između dva modela polimernih kolektora.

To nije očekivani rezultat s obzirom na to da se zbog boljeg prijelaza topline na vodu očekuje veća učinkovitost. Međutim, kod parametarske analize pločastog solarnog kolektora pokazalo se da daljnje povećanje vrijednosti koeficijenta prijelaza topline ne utječe značajnije na povećanje efikasnosti. Također jedan od problema je i taj, što model s grijačem nije u potpunosti adekvatan za simulaciju izmjene topline unutar polimernog kolektora. Budući da se toplinski izvor koji predstavlja sunčevo zračenje postavlja na dno kanala u kojem se nalazi voda, zrači prema ostalim plohama koje okružuju kanal, mora se postaviti *coupled* rubni uvjet. Zbog toga nije moguće istovremeno postaviti konvektivni rubni uvjet te se utjecaj koeficijenta prijelaza topline modelirao kao prijelazni sloj između apsorbera i vode. Debljina prijelaznog sloja je 0,5 mm te se preko vodljivosti sloja modelirao koeficijent prijelaz topline. Također, postavljena je fiksna temperatura u cijelom području strujanja fluida što u potpunosti ne odgovara uvjetima strujanja unutar pravokutnog kanala. Također, nemogućnosti simuliranja strujanja u 2D simulaciji ograničava točnost numeričkog modela.

Smjernice za daljnji rad i konstrukciju:

1. U potpunosti definirati *semi transparent* model
2. Provesti 3D simulaciju u kojoj bi se uzelo u obzir strujanje unutar kanala
3. Provesti eksperimentalna ispitivanja kako bi se potvrdile numeričke simulacije
4. Smanjiti broj pokrova kod polimernog kolektora kako bi se povećala efikasnost, odnosno
5. Povećati prostor između pokrova i apsorbera s ciljem smanjenja drastičnijeg padanja efikasnosti pri većim vrijednostima ΔT

LITERATURA

- [1] de la Peña, J.L., Aguilar, R., Polymer solar collectors. A better alternative to heat water in Mexican homes, *Energy Procedia*, Vol. 57, pp. 2205-2210, 2014.
- [2] Cristofari, C., Notton, G., Poggi, P., Louche, A., Modelling and performance of a copolymer solar water heating collector, *Solar Energy*, Vol. 72, pp. 99-112, 2002.
- [3] Piekarczyk, A., Volk, M., Heck, M., Wiesmeier, S., Weiß, K.A., Köhl, M., Field test for polymeric collector models in different climatic locations, *Energy Procedia*, Vol. 91, pp. 384-391, 2016.
- [4] Rodriguez, J., Suarez, C., Numerical and experimental performance evaluation of a polymer direct solar irradiation collector, *Energy Procedia*, Vol. 57, pp. 2195-2204, 2014.
- [5] Hussain, S., Harrison, S.J., Experimental and numerical investigations of passive air cooling of a residential flat-plate solar collector under stagnation conditions, *Solar Energy*, Vol. 122, pp. 1023-1036, 2015.
- [6] Muehling, O., Seeboth, A., Ruhmann, R., Eberhardt, V., Byker, H., Anderson, C.D., De Jong, S., Solar collector cover with temperature-controlled solar light transmittance, *Energy Procedia*, Vol. 48, pp. 163-171, 2014.
- [7] Slaman, M., Griessen, R., Solar collector overheating protection, *Solar Energy*, Vol. 83, pp. 982-987, 2009.
- [8] Dović, D., *Obnovljivi izvori energije, Upotreba sunčeve energije u termotehničkim sustavima*. FSB, Zagreb, 2012
- [9] Dović, D.: *Numerička i eksperimentalna studija sunčevog kolektora s valovitim apsorberom*, Doktorski rad, FSB, Zagreb, 2005.
- [10] Dović, D., Andrassy, M., Numerically assisted analysis of flat and corrugated plate solar collectors thermal performances, *Solar Energy*, vol. 86, pp. 2416-2431, 2012.
- [11] Duffe, J.A., Beckman, W.A.: *Solar Engineering of Thermal Processes*, 4th edition, John Wiley & Sons, New Jersey, 2013.
- [12] *Natural Convection and Buoyancy-Driven Flows*, Fluent 6.3 User's Guide
- [13] *Discrete Ordinates (DO) Radiation Model Theory*, Fluent 6.3 User's Guide
- [14] Lienhard IV, J. H., Lienhard V, J. H., *A Heat Transfer Textbook*, 3rd ed., Phlogiston Press, Cambridge, Massachusetts, 2008.

PRILOZI

I. CD-R disc